

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

Fakultät Landbau / Landespflege Studiengang Produktionsmanagement im Gartenbau

Untersuchungen zu Wurzelstützstrukturen in aeroponischen
Systemen am Beispiel von *Lactuca sativa*.

Master – Arbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Master of Science (M. Sc.)
im Studiengang Produktionsmanagement im Gartenbau

Vorgelegt von
Johann Hempel
aus Dresden

Betreuer:

**Prof. Dr. agr. Prof. h.c.
F.-G. Schröder**



Hochschule für
Technik und Wirtschaft
Dresden
University of Applied Sciences

Dipl.-Ing. D. Schubert



Dresden, im November 2014

Erklärung über die eigenständige Erstellung der Arbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorgelegte Arbeit mit dem Titel:

„Untersuchungen zu Wurzelstützstrukturen in aeroponischen Systemen am Beispiel von *Lactuca sativa*.“

selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit als solche und durch Angabe der Quelle gekennzeichnet habe. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet. Mir ist bewusst, dass die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden Prüfungsarbeiten stichprobenartig mittels der Verwendung von Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft.

Ort, Datum

Unterschrift Student

Kurzreferat

Im vorangegangenen Versuch der vorliegenden Arbeit wurde die Anwendung von Wurzelstützstrukturen (RSS) und deren Wirkung auf die Pflanzenproduktivität im aeroponischen System untersucht. Als Beispieelpflanze wurde *Lactuca sativa* L. gewählt.

Mit Hilfe der RSS wurde das Wurzelvolumen gesteigert. Dabei wurden fünf verschiedene Varianten mit einer Kontrollgruppe verglichen. Der Gesamtversuch wurde in vier Teilversuche untergliedert, von denen zwei Versuche solide Ergebnisse lieferten. Verwendet wurde ein „high-pressure“ Aeroponik-System.

Die Ergebnisse zeigen keine eindeutigen Veränderungen. Es ist eine leichte Tendenz zugunsten der RSS zu erkennen. So wies die Variante „Dreieck“ im Versuch 2 eine 6,57% höhere Trockenmasse auf, als die Kontrolle. Sonst waren die Unterschiede kaum erfassbar. Die RSS verringerten die Wurzeldichte. In Versuch 4 zeigten Pflanzen mit geringerer Wurzeldichte eine höhere Blatttrockenmasse.

Die leichte Tendenz soll in weiteren Versuchen mit einer höheren Anzahl Pflanzen und präziseren Methoden bzw. Versuchseinrichtungen erneut durchgeführt werden, um signifikante Veränderungen zu ermitteln und die Ergebnisse reproduzierbar zu machen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen.....	4
2.1.	Das aeroponische System.....	4
2.1.1.	Geschichte	4
2.1.2.	Aeroponik in der Raumfahrt	6
2.1.3.	Die Grundlagen der Aeroponik.....	7
2.1.4.	Vorteile und Nachteile Aeroponik	9
2.1.5.	Kommerzielle Aeroponik Beispiele	11
2.1.6.	Aeroponik Beispiele aus der Forschung.....	14
2.2.	Sauerstoff in der Pflanze	16
2.2.1.	Sauerstoffaufnahme (RAVEN et al. 2013)	17
2.2.2.	Der Energieträger der Pflanze (KUTSCHERA 2002)	18
2.2.3.	Atmung (BUCHANAN et al. 2000)	18
2.3.	Wurzel	20
2.3.1.	Aufgaben der Wurzel (RAVEN et al. 2013)	20
2.3.2.	Bodendurchlüftung	21
2.3.3.	Wurzelarchitektur	22
2.3.4.	Wurzelvermessung	23
2.4.	Artbeschreibung Lactuca sativa.....	25
3	Material und Methoden	27
3.1.	Die Gewächshauskabine	27
3.2.	Das aeroponische System.....	29
3.2.1.	Traydesign	32
3.2.2.	Root Support Structures.....	33
3.3.	Versuchsablauf.....	38
3.4.	Messmethoden	40
3.4.1.	Blattfläche	41
3.4.2.	Wurzellänge und Wurzelverzweigung	42
3.4.3.	Wurzelvolumen	44
4	Ergebnisse und Diskussion.....	45
4.1.	Einzelauswertung der Varianten	47
4.2.	Statistische Auswertung	54
4.3.	Spezielle Auswertungen	54
4.3.1.	Ausfallrate	55
4.3.2.	Der Einfluss des Lichts auf die Gesamt TM	55
4.3.3.	Einfluss der Pflanzendichte (Am Beispiel Tray 2 Versuch 2)	57
4.3.4.	Unterschiede zwischen den Trays	59

4.3.5. Vergleich Gesamt TM in den Versuchen 2 und 4.....	60
4.3.6. Einfluss der RSS auf die Pflanzen am Beispiel Versuch 4.....	64
4.4. Fehlerbetrachtung	67
4.4.1. Fehler bei der Versuchsdurchführung	67
4.4.2. Fehler bei der Ermittlung der Messwerte	69
5 Zusammenfassung	71
6 Literaturverzeichnis.....	73
7 Anhang.....	84
7.1. Anhang EC- und pH-Wert.....	85
7.2. Anhang Versuchsanordnung	87
7.3. Anhang Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest	88
7.4. Anhang Einfaktorielle ANOVA	89
7.5. Anhang Regression Volumen/Masse.....	92
8 Inhalt Anhangs-CD.....	93

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Bedeutung
μCT	Micro-Computed Tomografie
ADP	Adenosindiphosphat
AIS	Aeroponic Inflatable System
ANOVA	Analysis Of Variance
ATP	Adenosintriphosphat
CAD	Computer-Aided Design
CEA	Controlled Environment Agriculture
CELSS	Closed Ecological Life Support System
CIP	International Potato Center
EBB-FLOW	Ebbe-und-Flut-Technik
EC	Electrical Conductivity
FAD	Flavin-Adenin-Dinukleotid
FM	Frischmasse
GWH	Gewächshaus
LED	Light-Emitting Diode
LLC	Limited Liability Company
LSS	Life Support Systems
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NAD	Nicotinadenindinucleotid
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NFT	Nutrient Film Technique
NN	Normalnull
PAR	Photosynthetically Active Radiation
pH	Potentia Hydrogenii
PSS	Plant Support Structure
PSTOL1	Phosphorus-Starvation Tolerance 1
PVC	Polyvinylchlorid
RMT	Rapid Multiplication Technique
RSS	Root Support Structure
TM	Trockenmasse
WSS	Wurzelstützstruktur

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aeroponik System von AeroFarms™ (2014b)

Abbildung 2: Gemessene PAR für die einzelnen Pflanzlöcher der Trays in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Abbildung 3: A: Tray 3 und 4; B: Pumpen und deren Anschlüsse; C: Filter im Tank; D: Filter vor Tank

Abbildung 4: CAD Zeichnung eines Trays

Abbildung 5: Querschnitt PSS

Abbildung 6: Foto Kegel (links); CAD Zeichnung Kegel (Mitte); Draufsicht CAD Zeichnung Kegel (rechts)

Abbildung 7: Foto Dreieck (links); CAD Zeichnung Dreieck (rechts)

Abbildung 8: Foto Halbkugel (links); CAD Zeichnung Halbkugel (rechts)

Abbildung 9: Foto Pyramide (links); CAD Zeichnung (rechts)

Abbildung 10: Foto Quadrat (links); CAD Zeichnung Quadrat (rechts)

Abbildung 11: Timeline des Gesamtversuches

Abbildung 12: Schnittstelle (roter Kreis) zwischen Wurzel und Blatt

Abbildung 13: Foto Blätter 04A43 (links); Ausschnitt Blattflächenmessung in CAD-KAS Bild-Vermessen® (rechts)

Abbildung 14: Foto 02C30 (links); CAD Zeichnung 02C30 (rechts)

Abbildung 15: Gesamtsumme der Gesamt TM in g der Varianten Versuch 4; Anzahl (N) = 11 Pflanzen pro Variante

Abbildung 16: Tray 2 Versuch 2 Gesamt TM der einzelnen Pflanzen in g

Abbildung 17: Verteilung der Gesamt TM (in %) auf die einzelnen Trays in den Versuchen 2 und 4

Abbildung 18: Boxplot Gesamt TM (in g) der Varianten A, B, C und F in Versuch 2

Abbildung 19: Boxplot Gesamt TM (in g) der Varianten A, B, C und G in Versuch 4

Abbildung 20: Vergleich der Gesamt TM (in g) zwischen A und B, C, F in Versuch 2

Abbildung 21: Boxplot Gesamt TM (in g) zwischen A und B, C, G in Versuch 4

Abbildung 22: Wurzelvolumen in cm^3 und Gesamt TM in g der Pflanzen in Versuch 4

Abbildung 23: Wurzeldichte und Blatt TM der Pflanzen in Versuch 4

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzung der Stammlösung

Tabelle 2: Pflanzenanzahl in den einzelnen Versuchen und Varianten

Tabelle 3: Durchschnittswerte der Messergebnisse, FM = Frischmasse; TM =
Trockenmasse

Tabelle 4: Messergebnisse Variante A und Vergleich mit den
Durchschnittswerten aus Tabelle 3 in %

Tabelle 5: Messergebnisse der Variante B - Kegel und Vergleich zu Variante
A in %

Tabelle 6: Messergebnisse der Variante C - Dreieck und Vergleich zu
Variante A in %

Tabelle 7: Messergebnisse der Varianten E - Halbkugel, F - Pyramide, G -
Quadrat und Vergleich zu Variante A in %

Tabelle 8: Ausfallrate nach Variante

Tabelle 9: Korrelation zwischen PAR und Gesamt TM nach Pearson

1 Einleitung

Zu Beginn der Arbeit soll der Leser mit der Thematik vertraut gemacht werden. Initiator der Arbeit war die Deutsche Luft- und Raumfahrt. Deshalb beginnt die Arbeit mit einem Einblick in den Zusammenhang zwischen Pflanzen und Raumfahrt. Darauf aufbauend soll die Zielstellung der Arbeit formuliert werden.

Im theoretischen Teil wird das Thema „Aeroponik“ zusammengefasst. Anschließend werden die, speziell für die Aeroponik, wichtigen Themen: „Wurzeln“ und „Sauerstoff in der Pflanze“ betrachtet. Hierbei wird ein umfassender Einblick in die vorhandene Literatur geliefert und aktuelle wissenschaftliche sowie wirtschaftliche Ergebnisse einbezogen.

Der Teil Material und Methoden berichtet über den Ablauf des Versuches. Es werden Hinweise auf die verwendeten Geräte und Einstellungen (z.B. Zusammensetzung der Nährlösung) gegeben, um die Reproduzierbarkeit des Versuchssystems zu gewährleisten. Die verwendeten Messmethoden werden dargestellt. Die Urdaten sind der Anhangs-CD zu entnehmen (vgl. Inhalt Anhangs-CD S. 93).

Das Kapitel Ergebnis und Diskussion beschäftigt sich mit der Darstellung der Ergebnisse und der Interpretation dieser. Hauptaugenmerk sind dabei die einzelnen Teilversuche und die verwendeten Varianten. Die wichtigsten Erkenntnisse wurden zusammengefasst.

Am Ende sollen Möglichkeiten und Verbesserungen für nachfolgende Versuche aufgezeigt werden.

Einführung

Schon immer greifen die Menschen nach den Sternen. Auf Grund der unendlichen Weiten des Universums wird es selbst mit fortschrittlichsten Technologien viel Zeit benötigen durch die Galaxien zu reisen. Um langfristige Missionen im Weltall durchführen zu können, muss bei einem bemannten Raumflug die Versorgung der Mannschaft sichergestellt werden. Das betrifft vor allem die Grundbedürfnisse unseres Lebens. Wir benötigen Luft, Wasser und Nahrung. Die Versorgung von der Erde gestaltet sich mit zunehmender Entfernung schwieriger. Die Transportkosten für 1 kg von der Erde bis zum Mars belaufen sich auf 11.000 \$ (ZASYPKIN & LEE 1999) bis zu 16.500 \$ (BARTA & HENNINGER 1994). Da ein auf Nachschub

basierendes System somit teuer und riskant ist, werden autarke Strukturen bevorzugt. Der derzeitige Ansatz zur Sicherstellung dieser Ressourcen vereinigt sich im Life Support Systems (LSS). Der Kerngedanke hierbei ist, Energie und Ressourcen effektiv einzusetzen und nicht an die Umgebung abzugeben. Geschlossene Kreisläufe (closed loop) senken die Energieverluste eines Systems auf ein Minimum. Solche Stoffkreisläufe haben sich über Millionen von Jahren auf der Erde erfolgreich etabliert. Die Stoffkreisläufe sind so aufgebaut, dass Konsumenten sich von Produzenten ernähren. Konsumenten werden von Destruenten zersetzt und dienen als Nahrung für Produzenten. In der Raumfahrt spiegelt sich dieser Sachverhalt im Closed Ecological Life Support System (CELSS) wieder. Dabei sollen ebenfalls Pflanzen als Nahrungslieferant für die Besatzung zur Verfügung stehen.

Pflanzen sind zudem in der Lage Wasser und Luft zu reinigen. Sie können unsere Nahrungsabfälle als Nährstoffquelle nutzen (KAWAMURA-AOYAMA et al. 2014). Bereits 13 – 15 m² Pflanzfläche auf einem Raum von ca. 105 m³ reichen aus, um eine Person mit sauberer Luft, Wasserreinigung und 30 – 40% seiner Ernährung (vegetarischer Teil) zu versorgen (BENAROYA 2010).

Derzeit ist es möglich bis zu 95% der Ressourcen wiederzuverwerten. Es gestaltet sich schwierig 100% zu erreichen, da bei allen Stoffumwandlungsprozessen Energie (z.B. in Form von Wärme) verloren geht oder Stoffe entstehen, die kontaminiert oder nicht recyclebar sind (ECKART 1996).

Zusätzlich zur Reinigungsfähigkeit haben Pflanzen weitere positive Eigenschaften. Pflanzen zu sehen, anzufassen oder auch zu hören hat auf Menschen einen positiven psychologischen Effekt. Dieser führt zu Stressreduzierung und Erholung. HELPHAND (2006) schreibt in seinem Buch „Defiant Gardens“: „As human beings we identify with nature’s vitality; it is alive, like us“.

In der Vergangenheit wurden schon Pflanzen in den Orbit gebracht und erfolgreich kultiviert. Obgleich sich die Systeme, in denen die Pflanzen kultiviert wurden, voneinander unterscheiden, müssen diese stets die gleichen Grundvoraussetzungen für die Pflanzen bereitstellen. Aktuell wird hierfür das aeroponische Anbauverfahren verwendet (STONER & CLAWSON 1998). Die Arbeit soll theoretische Grundlagen der Aeroponik zusammenfassen und mit Hilfe des Versuches eine Optimierung des Systems untersuchen.

Zielsetzung

MILLER et al. (2009) nennt als wichtigste Eigenschaft eines echten aeroponischen Systems, dass die Wurzeln so wenig wie möglich mit dem Anbausystem kollidieren, damit 100% der Wurzeln in der Luft hängen.

Im Versuch sollte der Einsatz von Wurzelstützstrukturen (WSS) bzw. Root Support Structures (RSS) untersucht werden. Die These dahinter war, dass eine Vergrößerung des Wurzelvolumens innerhalb des Aerosols die Aufnahme von Sauerstoff und Nährstoffen steigert und somit eine Verbesserung des Pflanzenwachstums ermöglicht wird.

Das Ziel der Arbeit war, die Auswirkung von RSS auf die Pflanze zu prüfen. In mehreren Teilversuchen sollten die angewendeten RSS auf ihre Kompatibilität zu den Pflanzen untersucht werden. Die herausragende Frage war, ob durch die Verwendung von RSS eine Ertragssteigerung ermöglicht werden konnte oder ob sich in irgendeiner Form eine Verbesserung der Pflanzen erkennen lässt.

Um Unterschiede festzustellen, wurden regelmäßige Bonituren durchgeführt und verschiedene Messwerte ermittelt.

Zunächst soll eine theoretische Übersicht dem Leser einen Einstieg in das Gebiet der Aeroponik geben.

2 Theoretische Grundlagen

Beginnend mit einer Einführung in das aeroponische System, soll dem Leser die Besonderheiten des Systems nahe gebracht werden. Die Vorteile und Nachteile des Systems sollen diskutiert werden. Anhand einiger Beispiele werden die Chancen für Wissenschaft und Wirtschaft in der Anwendung der Aeroponik dargelegt.

Die Aeroponik kennzeichnet sich durch eine hohe Verfügbarkeit von Sauerstoff. Die Notwendigkeit des Elements für die Pflanze soll in Kapitel 2.2 beschrieben werden.

Von dieser Verfügbarkeit des Sauerstoffs profitiert zunächst die Wurzel der Pflanze. Deshalb wird diese in den Fokus, der weiteren theoretischen Betrachtungen, gerückt.

2.1. Das aeroponische System

Die Aeroponik ist ein modernes System der Pflanzenproduktion. Den meisten Menschen ist dieses Verfahren nicht bekannt, obwohl die Entwicklung Anfang des 20. Jahrhunderts begann.

2.1.1. Geschichte

Als Vorbild für die Aeroponik dient die in den Tropen auf Bäumen wachsende Orchidee (STONER 1983a). Ein ähnliches Vorgehen zeigt *Onymacris unguicularis*. Der Schwarzkäfer aus der Namibwüste lässt an seinem Hinterteil den Nebel aus dem Atlantik kondensieren und versorgt sich so mit Wasser (HAMILTON & SEELY 1976).

Die Technik, Pflanzen erdlos anzubauen, reicht zurück bis in die 1920er Jahre. Zu dieser Zeit nutzten Botaniker eine primitive Form der Aeroponik für Untersuchungen an Pflanzen – hauptsächlich im Hinblick zur Wurzelphysiologie (BARKER 1922). Bekannt ist, dass CARTER 1942 Pflanzen in Wasserdampf kultivierte, um den Wurzelbereich zu erforschen.

Inzwischen werden aeroponische System weltweit eingesetzt (NASA 2006). 1952 gelang es TROWEL Apfelbäume in einem Sprühsystem zu kultivieren (STONER 1983a). 1957 benannte WENT dieses Sprühprinzip als „aeroponisch“. Das Wort

„Aeroponik“ wird abgeleitet aus dem Griechischen „aero“ für Luft und „ponos“ für Arbeit (MILLER et al. 2009). Er kultivierte Kaffee und Tomaten, indem er die Wurzelzone in einen Nährlösungsnebel hüllte. BIDDINGER et al. schrieb 1998, dass im aeroponischen System Gemüse und Zierpflanzen erfolgreich kultiviert werden.

Das erste kommerzielle und damals revolutionäre aeroponische System war die „Genesis Machine“ der Firma GTi (STONER 1983b). Die Apparatur wurde über einen Mikrochip gesteuert und Hochdruckdüsen, welche das feine Aerosol erzeugten, versorgten die Pflanzen mit Nährlösung. Das System benötigte lediglich einen Wasser und Stromanschluss (STONER 1983b).

Erfolgreich war das neue System im Bereich Vermehrung. Erstmals war es möglich den ganzen Prozess in einer automatisierten Einheit zu bearbeiten. Pflanzen, die nur schwer oder gar nicht über Stecklinge vermehrt werden konnten, wurden nun einfach über Stammstecklinge vermehrt.

Die schnelle und saubere Wurzelentwicklung in einer sterilen, nährstoffreichen, feuchten und sauerstoffreichen Umgebung ermöglichte eine einfache und schnelle Vermehrung von tausenden Pflanzen (MILLER et al. 2009).

Es zeigte sich, dass aeroponisch vermehrte Pflanzen weniger anfällig gegenüber dem Transplantationsschock (häufiges Problem bei Hydrokultur) waren (STONER & CLAWSON 1998).

1985 stellte GTi die zweite Generation das „Genesis Growing System“ vor. Das geschlossene System war weltweit das erste aeroponische Pflanz- und Erntesystem (MILLER et al. 2009).

In den Neunzigern entwickelte General Hydroponics [Europe] das „Aerogarden System“ für den Hobbybereich. Im Gegensatz zum „echten“ aeroponischen System werden hierbei nur feine Tröpfchen der Nährlösung zu den Wurzeln geleitet, anstatt sie in ein Aerosol zu hüllen (MILLER et al. 2009).

STONER gilt als der Vater der kommerziellen Aeroponik. Seine Designs, Technik und Ausstattungen werden weltweit von führenden Universitäten und Züchtern verwendet (STONER & CLAWSON 1998). Besonderen Zuspruch für seine Arbeit erhielt er aus der Raumfahrt – die NASA finanzierte einige seiner Projekte.

Innovationen und neue Technologien in der Raumfahrt können auch auf die Erde übertragen werden. Die derzeitige Weltbevölkerung beträgt etwa 7,2 Milliarden Menschen. Im Jahr 2025 sollen 8,1 Milliarden und 2050 9,6 Milliarden Menschen auf der Erde leben (GERLAND et al. 2014). Die Produktion von Lebensmitteln muss effektiver gestaltet werden, um die Versorgung sicherzustellen. Das aeroponische Anbauverfahren kann einen Beitrag dazu leisten.

2.1.2. Aeroponik in der Raumfahrt

1960 kamen mit den beiden Missionen „Sputnik 4“ und „Discover 17“ die ersten Pflanzen in den Orbit¹ (HALSTEAD & SCOTT 1990). An diesen Pflanzen wurde zunächst die Auswirkung der geringeren Gravitation auf die Orientierung von Wurzeln und Trieben untersucht (HALSTEAD & SCOTT 1990).

1998 erhielt STONER finanzielle Mittel von der NASA für die Entwicklung eines Hochleistungs–Aeroponic–Systems für die Erde und den Weltraum. Er zeigte, dass die Trockenmasse von Salat erheblich gesteigert werden kann, wenn dieser aeroponisch kultiviert wird (STONER & CLAWSON 1998).

STONER & CLAWSON (1998) nannten das aeroponische System die „logische Wahl“ für die effiziente Pflanzenproduktion in der Raumfahrt. Sie begründeten ihre Aussage mit folgenden Eigenschaften des Systems:

- Verringerung Volumen und Gewicht der Verbrauchsmaterialien
- Senkung Krankheitsdruck
- Minimierung Wasserverbrauch
- Reduzierung Abfallmenge
- substratlos
- Erhöhung Sauerstoffversorgung der Pflanze
- Steigerung Pflanzenwachstum und bessere Nährstoffversorgung als andere Systeme in der Schwerelosigkeit.

¹ Die ersten Pflanzen im Orbit waren *Triticum aestivum* L., *Vicia faba* L., *Zea mays*, *Allium fistulosum*, *Nigella damascena* und *Chlorella pyrenoidosa* (NASA 2006; DRESCHER et al. 1993).

1999 entwickelte STONER (durch die NASA finanziert) ein aufblasbares „low-mass aeroponic system“ (AIS) für die Nahrungsmittelproduktion. Das AIS soll die gleiche Produktivität bieten bei gleichzeitiger Einsparung von Transportgewicht und -volumen (STONER & CLAWSON 2000).

Für Marsmissionen errechnete die NASA in Simulationen, dass die Mannschaft 60% ihrer Zeit für die Selbstversorgung aufwenden muss. Der Einsatz des aeroponischen Systems als Anbauverfahren eignet sich auf Grund des niedrigen Wasser- und Energieaufwandes und der hohen Produktion pro Einheit (MILLER et al. 2009).

2.1.3. Die Grundlagen der Aeroponik

Aeroponische Anbauverfahren zählen zu den substratlosen Kulturverfahren und zur Hydroponik, da die Nährstoffe über das Wasser zur Pflanze gelangen (MILLER et al. 2009). Die Pflanze wird durch die PSS (plant support structure) im System verankert. Damit wird die Verankerung durch die Wurzel obsolet. Die Wurzel hängt völlig frei in der Luft und hat nur noch die Aufgabe Nährstoffe, Wasser und Luft aufzunehmen. Anders als im traditionellen hydroponischen oder aquaponischen System werden im aeroponischen System die Wurzel mit einem Gemisch aus Nährstoffen und Wasser besprüht – dem sogenannten „Aerosol“.

Aerosole sind Dispersionen (Gemische) flüssiger oder fester Partikel in Gasen – in diesem Fall die zerstäubte Nährlösung in der Luft. Die Partikel oder auch Schwebeteilchen werden als Aerosolpartikel bezeichnet (SCHNELLE-KREIS et al. 2007).

Die Zerstäubung der Nährstofflösung erfolgte im Versuch über feine Nebeldüsen (vgl. Kapitel Das aeroponische System, S. 29). Die Partikelgröße ist sehr wichtig für den Erfolg des Systems. Zu große Partikel bedeuten weniger Sauerstoffverfügbarkeit für die Wurzeln. Zu kleine Partikel führen zur Ausbildung unnötig vieler Wurzelhaare und somit verringerter Entwicklung des seitlichen Wurzelsystems (STONER & CLAWSON 1998). Die Forschungen der NASA ergaben, dass eine Partikelgröße von 5-50 µm optimal ist (MILLER et al. 2009).

Werden, wie im durchgeführten Versuch für diese Arbeit, nur die Rückflüsse aus dem Wurzelraum wiederverwertet, dann ist dies ein teilweise geschlossenes System,

da der obere Teil der Pflanze aus dem System ragt und Stoffe an die Umgebung abgibt.

Krankheiten und Schädlinge stellen im geschlossenen aeroponischen System ein kalkulierbares Risiko dar, da nur das Eindringen und Entstehen von z.B. Pathogenen verhindert werden muss. Zusätzlich können durch das Besprühen der Wurzeln Fremdkörper abgespült werden. Meist werden Schädlinge und Krankheiten über Substrat übertragen. Im aeroponischen System ist dieses nicht vorhanden und die Nährlösung kann desinfiziert werden (MILLER et al. 2009).

Für Forscher ist das aeroponische System eine wertvolle, einfache und schnelle Methode zur Vorauswahl von Genotypen für die Resistenz gegen bestimmte Keimlings- oder Wurzelfäulen“ (DU TOIT et al. 1997). Die Isolation des Systems erlaubt ihnen Beobachtungen ohne die Einflüsse des Substrates wahrzunehmen. Das aeroponische System ermöglicht weiter unterschiedliche Forschungen (siehe. ZOBEL et al. 1975, CALLAHAM et al. 1979, NIR 1982, PETERSON & KRUEGER 1988, MARTIN-LAURENT et al. 1997, BURGESS et al. 1998).

Um exakte Versuchsergebnisse erzielen zu können, wird eine präzise Regulierung einzelner Faktoren (z.B. Temperatur, Sauerstoffgehalt) der Wurzelzone benötigt (ZOBEL 1989). Diese präzise Regulierung kann mit Hilfe des aeroponischen Systems erfolgen (WEATHERS & ZOBEL 1992). Zudem können Wurzeln ohne Beschädigungen entnommen und untersucht bzw. schon während des Wachstums beobachtet werden.

Die Anwendung der Aeroponik führte zu Forschungsergebnissen im Bereich Nährstoffaufnahme von Pflanzen, Wasserstress, Pflanzengesundheit, Gasaustausch und Optimierung der Produktion von Nutzpflanzen in Controlled-Environment Agriculture (CEA) (BARAK et al. 1996, HOEHN 1998, HUBICK 1982, COSTON et al. 1983, KRATSCH et al. 2004).

Grundsätzlich unterscheiden sich zwei Typen von aeroponischen Systemen. Es existieren „low-pressure“, welche die Nährlösung als Strahl oder Tropfen den Pflanzen zuführt und „high-pressure“ oder auch „true aeroponics“, welche ein feines Aerosol erzeugen (MILLER et al. 2009). In der Arbeit wird sich immer auf die „high-pressure“ Variante bezogen, welche auch in den begleitenden Versuchen zum Einsatz kam.

Die Aeroponik verfügt über ein breites Einsatzspektrum. Die Vor- und Nachteile des Systems sollen Aufschluss darüber geben, für welche Anwendung sich die Aeroponik eignet.

2.1.4. Vorteile und Nachteile Aeroponik

Die Aeroponik bietet, aufgrund ihrer Eigenschaften, eine Vielzahl von Möglichkeiten es ergeben sich aber auch Herausforderungen bei der Umsetzung. In diesem Kapitel sollen die essentiellsten Eigenschaften der Aeroponik aufgezählt werden.

Vorteile

Für den Einsatz des aeroponischen Systems sprechen folgende Vorteile (MILLER et al. 2009):

- Aeroponische System benötigen weniger Nährlösung und Wasser als vergleichbare Systeme. Der Nährlösungsdurchfluss bei z.B. NFT (nutrient film technique) liegt pro Minute bei etwa 1 Liter, während bei Aeroponik nur etwa 1,5 Milliliter benötigt werden. Diese Einsparung führt zu einer hohen Kosteneffizienz.
- Die kurze Zeit in der die Wurzeln vom Aerosol umgeben sind steht auch für die kurze Zeit in der die Wurzeln eine Verbindung zueinander haben. Die Verkürzung dieser Verbindung verringert die Übertragung von Pathogenen zwischen den Pflanzen.
- Kein anderes System erlaubt die vollständige Kontrolle des Wurzelraumes.
- Es besteht die Möglichkeit unterschiedliche Nährlösungen zu verwenden, ohne erst die Vorherige Nährlösung zu entfernen.
- Durch die Einstellung des Intervalls oder Dauer des Sprühvorganges ergeben sich neue Möglichkeiten (z.B. 5 vs. 10 s langer Sprühvorgang) in der Versuchsdurchführung. Die Parameter können zudem kulturspezifisch eingestellt werden.
- Die Entnahme von Einzelpflanzen sorgt nicht automatisch dafür, dass Pflanzenteile (z.B. Wurzeln) anderer Pflanzen beschädigt werden.
- Das System verbessert die Produktion von pathogenfreiem Saatgut (HAYDEN & PAGLIARULO 2001).
- Nährlösung und pH-Wert sind einfach steuerbar, dies reduziert die Nährlösungsmenge und das Risiko von Rückständen im Grundwasser (NICHOL 2007).

- Die Aeroponik eignet sich sehr gut für hohe Pflanzdichten – bei Blattgemüse und Kräutern wurde mit 100 Pflanzen/m² der höchste Ertrag erzielt (BÖHME & PINKER 2014).
- Im Versuch mit *Urtica dioica* ergaben sich wesentlich höhere Erträge im Vergleich zum Feldversuch. Die Forscher ermittelten folgende Vorteile des aeroponischen Anbaus (GIACOMELLI et al. 2004): (1) Beschleunigung Wachstumsrate und Reife (2) deutliche Ertragssteigerung (3) Steigerung Produktion von Biomasse und Sekundärmetaboliten und (4) Erzeugung schadstofffreier Produkte.

Nachteile

Die Komplexität des Systems im Vergleich zu konventionellen Anbaumethoden führt zu hohen Anschaffungs- und Produktionskosten. Für ein 80 m² großes Aeroponiksystem für Kartoffeln in Peru entstehen Kosten von 3.650 US \$ (MATEUS-RODRIGUEZ 2013).

OTAZÚ (2010) fasst die Nachteile wie folgt zusammen:

- hohe Energieaufwand
- bestehende Anwendungsprobleme in warmen Gebieten (hohe Rhizosphärentemperatur)
- hoher Bedarf an speziell ausgebildetem Personal
- Wurzelpathogene können schnell alle Boxen kontaminieren

Die speziellen Eigenschaften des Systems erweisen sich in vielen Bereichen als nützlich. Auf einige solcher Beispiele soll nun näher eingegangen werden.

2.1.5. Kommerzielle Aeroponik Beispiele

In diesem Abschnitt sollen einige Beispiele aus unterschiedlichen Bereichen genannt werden, bei denen die Aeroponik zum Einsatz kommt. Jedoch gibt es weitaus mehr Projekte im Zusammenhang mit aeroponischen Systemen.

Hi-tech farming: growing plants in urban warehouses (BALCH 2013)

AeroFarms™ ist eine der wenigen Firmen weltweit, die damit begonnen hat aeroponische Systeme kommerziell zu vertreiben. Die Firma aus New Jersey möchte ihr System vor allem in dicht besiedelten Gebieten etablieren. Dort sollen AeroFarms™ entstehen und die Bevölkerung mit lokal produziertem Gemüse versorgen. Die ersten Farmen werden bereits in den USA und Dschidda (Saudi Arabien) betrieben.

Vorteile sieht AeroFarms™ hauptsächlich in der Wassereinsparung, aber auch in der Einsparung von Dünger und Pflanzenschutzmitteln. Dementgegen stehen die hohen Investitionskosten und die hohen Energiekosten. Das Unternehmen erhofft sich über ein Franchise-System Kunden zu gewinnen.

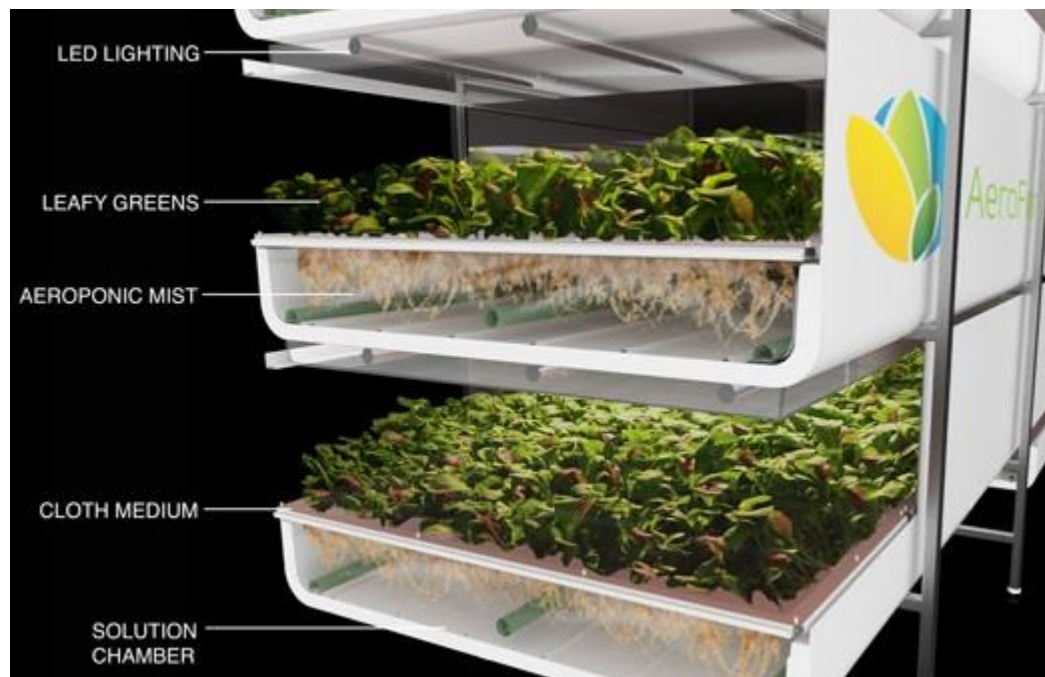


Abbildung 1: Aeroponik System von AeroFarms™ (2014b)

Die Pflanzen werden in mehreren Schichten übereinander kultiviert (Abbildung 1). Zusätzlich zu den dargestellten Bauteilen befinden sich zwischen den Pflanzen und dem Licht vereinzelt Ventilatoren, die die Luft zirkulieren lassen.

Die Besonderheit bei diesem System ist die PSS (plant support structure). Die Farm ähnelt einem Förderband: auf der einen Seite werden die Samen ausgesät und dann wandern die Pflanzen bis zum Ende, wo sie geerntet werden können. Hierbei stehen die Pflanzen die gesamte Zeit auf einer Stoffbahn. Stoff als RSS hat laut AeroFarms™ (AEROFARMS™ 2014a) folgende Vorteile: Langlebigkeit, Wiederverwendbarkeit, erhöhte Sauberkeit und Hygiene und eine effizientere Ernte. Für die Ernte können die groben Pflanzenteile mit einem Schneidgerät geerntet und der Rest vom Stoff abgekratzt werden. Praktisch ist hierbei, dass kaum Wurzelteile geerntet werden.

MIT CityFARM (HARPER 2014; TUHUS-DUBROW 2014)

Im Media Lab des Massachusetts Institute of Technology (MIT) forschen Wissenschaftler an neuen Methoden für das „Urban Farming“. Das Modul ist hinter der Glaswand im Inneren des Gebäudes aufgebaut und nutzt somit auch natürliches Licht. Abhängig vom verfügbaren Sonnenlicht wird Zusatzlicht per LED eingespeist. Die Keimung erfolgt zurzeit noch außerhalb des Systems. Im Kampf gegen Läuse werden Marienkäfer eingesetzt.

Microgreen Farm (BROWN 2009; WEAVER 2008)

FORREST aus Colorado produziert Sprösslinge für über 100 Restaurants – und zwar aeroponisch. Viele seiner Kunden sind überzeugt von der Qualität der Produkte. Vorteilhaft ist hier, dass die Pflanzen vor der Verarbeitung kaum gereinigt werden müssen. Zudem ist keine Behandlung mit Kupfersulfat nötig, was im biologischen Anbau oft verwendet wird – die Behandlung sorgt für Blaufärbungen der Pflanzen und schlechten Geschmack. FORRESTS Zukunftsvision ist seine Produkte in jeden Haushalt zu liefern – was zurzeit eine kostspielige Angelegenheit ist.

Tower Garden (SESSA 2014)

Als ein kommerzielles Beispiel für „low-pressure“ Aeroponik kann die Future Growing® LLC genannt werden. Das Unternehmen ist führend im Bereich der vertikalen Aeroponik und vermarktet ein System namens „Tower Garden®“.

Laut Hersteller recycelt das System 100% der Nährlösung, benötigt 95% weniger Wasser im Vergleich zum konventionellen biologischen Anbau. Zudem benötigt das System 90% weniger Anbaufläche. Die Pflanzen werden in die Towers bzw. Säulen gesteckt, sodass die Wurzeln sich in der Säule befinden. Die Nährlösung tropft von oben durch die Säule und versorgt so die Pflanzen. Die Anlagen werden mit Solar-, Wind- und Thermalenergie betrieben.

Mixponics (SINAN 2014)

In der Türkei entwickelte SINAN 2012 Mixponics – ein System aus EBB-FLOW, Floating Raft und Aeroponik. Dahinter steckt ein ehrgeiziges Ziel: 1512 Salatköpfe pro m² sollen in 12 Monaten in einem Lagerhaus (Produktion im GWH nur 10 Monate möglich) mit einem Einzelpflanzengewicht von 200g produziert werden. Die Jungenpflanzen werden 30 Tage im EBB-FLOW angezogen. Danach kommen die Pflanzen für 30 Tage ins Floating Raft System. Dann werden die Pflanzen in ein „Pyramid Aeroponic System“ überführt und werden nach weiteren 15 Tagen geerntet. Da aber nur zwei Seiten der Pyramide verwendet werden zählt das System eher zu den A-Frame-Systems².

² Das A-Frame-Design ist vergleichbar mit dem Dach bzw. Dachbinder eines Hauses. (Hayden & Pagliarulo 2001)

2.1.6. Aeroponik Beispiele aus der Forschung

Spezialkulturen: Heilkräuter

Heilpflanzen werden primär oder zusätzlich für 80% der weltweiten Gesundheitsversorgung eingesetzt (WORLD HEALTH ORGANIZATION 2002). An der Universität von Arizona wurde von August 2003 bis Februar 2004 *Urtica dioica* im aeroponischen System erfolgreich angebaut.

Das Anbausystem hat einen signifikanten Einfluss auf die Wurzelbiomasse und das Wurzel/Spross-Verhältnis ($p < 0,001$). Im Vergleich zu anderen erdlosen Verfahren war die Wurzelbiomasse geringer, die Sprossbiomasse gleich hoch. Eine mehrfache Ernte ergab einen höheren Ertrag, als mehr Pflanzen in das System zu setzen. In der Aeroponik stecken noch viele Herausforderungen z.B. Optimierung der Wasserzirkulation oder der Wurzelzonentemperatur. Sobald die optimalen Einstellungen gefunden sind, wird die Aeroponik ein wichtiges Werkzeug in der Produktion von Heilpflanzen, so die Forscher (GIACOMELLI et al. 2004).

In einem Versuch mit *Anemopsis californica* wurden verschiedene Inhaltsstoffe gemessen. Auf dem Feld gewachsene Pflanzen enthielten eine höhere Konzentration an Monoterpenen (z.B. Methyl, Eugenol, Thymol) als aeroponisch kultivierte. Unübertroffen hoch war der Ertrag/m², aber es müssen noch Untersuchungen folgen, um das aeroponische System für die Anwendung zu optimieren (HAYDEN 2006).

Bei Blattgemüse und Kräutern erreichten Pflanzen im aeroponischen System höhere Vitamin C-Gehalte. Der Gehalt an ätherischem Öl war in *Perilla frutescens* und *Ocimum sanctum* in Substrat kultiviert höher als aeroponisch kultiviert. Ebenso zeigte *Ipomoea aquatic* im Substrat den höchsten Karotinanteil verglichen zur aeroponischen Variante (BÖHME & PINKER 2014).

Pflanzkartoffeln

Das International Potato Center (CIP) arbeitet an aeroponischen Systemen für die Herstellung von Pflanzkartoffeln. Angewendet wird diese Technik vor allem in Entwicklungsländern (z.B. Kenia) (MBIYU et al. 2013).

Das Verfahren bietet die Möglichkeit gesundes und unbelastetes Pflanzgut zu erstellen. Die Knappheit von Pflanzgut hat einen sehr großen Einfluss auf die Kartoffelproduktion in Kenia (MOA/GTZ 2009), weshalb die Bauern die Kartoffeln auf dem eigenen Acker vermehren und somit Krankheiten verbreiten. Um dem entgegen zu wirken sollen die Kartoffeln aeroponisch vermehrt werden.

Die Vorteile des Systems überwiegen die hohen Investitionskosten (KARINGA et al. 2010). Bei Versuchen wurden bis zu 800 Miniknollen/m² bei einer Pflanzendichte von 60 Pflanzen/m² gemessen über einen Zeitraum von fünf Monaten mit wöchentlicher Ernte – was eine 13-fache Steigerung des Ertrags zur konventionellen Produktion in Töpfen bedeutet (FARRAN & MINGO-CASTEL 2006).

In Peru erreicht das Team der CIP einen Ertrag von über 100 Knollen/Pflanze. Die Kombination aus den RMTs (rapid multiplication techniques) in vitro und Aeroponik ist nötig, um den Bedarf an Pflanzgut zu decken (CHINDI et al. 2014).

Auch in Korea wurden Kartoffeln erfolgreich aeroponisch angebaut (KANG et al. 1996; KIM et al. 1999; RITTER et al. 2001). Zusätzlich konnte eine wesentliche Ertragssteigerung erzielt werden.

Forschung an Wurzelschädlingen (VAUGHAN et al. 2011)

Die Wirkungen zwischen Pflanze und Schädling sind komplex. Für einen Versuch an *Arabidopsis thaliana* wurden Pflanzen mit *Bradysia* spp. Larven infiziert. Ziel war die Entwicklung eines Systems zur Untersuchung der Schäden einer solchen Infektion. Mit Hilfe der Aeroponik kann der Wurzelraum genau analysiert werden. Die dabei, durch die Pflanze, verwendeten Verteidigungsmaßnahmen (z.B. chemisch über Absonderung von Metaboliten) könnten in Folgeuntersuchungen aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Der Lauf der Geschichte hat gezeigt, wie sich aus einer Technologie der Raumfahrt eine Lösung entwickelt hat, die auch auf der Erde Potential aufweist. Es gibt viele Anwendungsgebiete der Aeroponik und viele Möglichkeiten. Eine wichtige Differenzierung zu anderen hydroponischen Anbauverfahren ist die hohe Verfügbarkeit von Sauerstoff.

2.2. Sauerstoff in der Pflanze

Das aeroponische System punktet vor allem mit der hohen Verfügbarkeit von Sauerstoff. Dieses Element ist von essentieller Bedeutung für die Pflanze. In diesem Kapitel soll diese Zweckdienlichkeit näher erläutert werden. Zudem soll der Weg des Sauerstoffs in und innerhalb der Pflanze dargestellt werden, um dem Leser ein theoretischen Einblick zu verschaffen.

Pflanzen benötigen Sauerstoff bei der Zellatmung. Die grünen Teile von Pflanzen erzeugen in den Chloroplasten über die Photosynthese Sauerstoff. Da Pflanzen über keine Möglichkeit des Sauerstofftransportes verfügen ist die Sauerstoffversorgung der Wurzel von der Umgebung abhängig. Die Sauerstoffaufnahme erfolgt hierbei über Diffusion an der Wurzeloberfläche (VAN DONGEN 2012), dafür muss Wasser an der Wurzeloberfläche vorhanden sein. SOFFER und BURGER (1988) bestätigten, dass im aeroponischen System der meiste Sauerstoff pflanzenverfügbar ist und sich positiv auf das Wurzelwachstum auswirkt.

In Versuchen mit *Gossypium hirsutum*, *Triticum aestivum* und *Ananas comosus* zeigte sich eine positive Wirkung auf Ertrag, Trockenmasse und Frischmasse durch die Anreicherung des Bodens mit Sauerstoff (CHEN et al. 2011).

Die kontinuierliche Zufuhr der drei Makroelemente O, C und H bildet die Voraussetzung des pflanzlichen Lebens. Die Pflanze produziert aus diesen Elementen Kohlenhydrate durch die zentralen Stoffwechselprozesse Zellatmung (O₂-Aufnahme) und Photosynthese (CO₂-Assimilation). Die Kohlenhydrate bilden etwa 95% der Trockenmasse der Pflanze (KUTSCHERA 2002).

Unter dem Begriff Zellatmung (Synonym: aerobe Dissimilation, Respiration) wird die stufenweise Oxidation energiereicher Kohlenstoffverbindungen zu energiearmen, anorganischen Endprodukten (CO₂, H₂O) unter Freisetzung von Energie verstanden.

Diese wird zum Teil als ATP gespeichert und dem Organismus zur Verfügung gestellt (KUTSCHERA 2002).

Nicht nur die Verfügbarkeit von Sauerstoff ist somit von essentieller Bedeutung, die Pflanze muss auch die Möglichkeit haben sich diesen Sauerstoff aufzunehmen und zu verarbeiten.

2.2.1. Sauerstoffaufnahme (RAVEN et al. 2013)

Sauerstoff bewegt sich von der Atmosphäre in die Rhizosphäre hauptsächlich durch Diffusion über die Gasphase (NICHOLSON et al. 1989; COLLIN & RASMUSON 1990; YANFUL 1993). Bevor es die Wurzeln erreicht wird der Sauerstoff in Wasser oder Biofilm gelöst (VAN NOORDWIJKAND & WILLIGEN 1984). Ein solcher Biofilm kann der Schleim sein, welcher von der Wurzel selbst durch die Dictyosomen³ des Golgi-Apparates gebildet wird (GUNNING & STEER 1996).

Die Löslichkeit des Sauerstoffs wird durch die Temperatur beeinflusst. Erhöht sich die Temperatur von 25 auf 40 °C verringert sich die maximale Löslichkeit von 8 zu 6 ppm (STEVEN et al. 1980).

Sauerstoff kann frei durch die Plasmamembran diffundieren. Sauerstoff, ein unpolares Molekül, ist lipidlöslich und gelangt leicht in die Lipiddoppelschicht. Die Diffusion ist der wichtigste Transportprozess für Substanzen innerhalb der Zelle.

Die Tatsache, dass die Zelle auf Diffusion angewiesen ist, begrenzt die Zellgröße, denn Diffusion ist ein langsamer Vorgang und nur über kurze Strecken effektiv. Über längere Strecken ist der Diffusionsprozess zu langsam, um Stoffwechselaktivitäten aufrechtzuerhalten. Für eine effiziente Diffusion ist ein steiler Konzentrationsgradient nötig, d.h., ein großer Konzentrationsunterschied über eine relativ kurze Distanz. Zellen erzeugen Konzentrationsgradienten durch ihre Stoffwechselprozesse. So wird zum Beispiel Sauerstoff in photosynthetisch nicht aktiven Zellen beinahe genauso schnell verbraucht, wie er hineingelangt.

Der Sauerstoff hat somit den Ort seiner Bestimmung erreicht und kann nun von der Pflanze verarbeitet werden.

³ Jede Zelle der Wurzelhaube enthält einige hundert Dictyosome (GUNNING & STEER 1996)

2.2.2. Der Energieträger der Pflanze (KUTSCHERA 2002)

Pflanzen benötigen für Zellaufbau, Zellreparatur und Energiespeicherung Nährstoffmoleküle. Diese Nährstoffmoleküle (im Allgemeinen ist damit Glucose gemeint) können sie durch Photosynthese selbst herstellen und werden in den Zellen in ATP (Adenosintriphosphat) umgewandelt.

ATP ist ein Molekül, welches als Energieträger fungiert. Es beinhaltet drei Phosphatgruppen. Die Bindungen zwischen diesen Gruppen sind relativ schwach und können sehr leicht durch Hydrolyse gespalten werden. Die Produkte dieser Reaktion sind ADP (Adenosindiphosphat), eine Phosphatgruppe und Energie. Da diese Energie abgegeben wird, kann sie zum Antreiben chemischer Reaktionen verwendet werden. Während der Atmung, beim Abbau von Glucose zu Kohlendioxid und Wasser, wird ADP wieder zu ATP „aufgeladen“.

Dieser Aufladungsprozess soll im Folgenden näher beschrieben werden, um Aufschluss über die Aufgabe des Sauerstoffs in der Pflanzenzelle zu geben.

2.2.3. Atmung (BUCHANAN et al. 2000)

Der Abbau von Glucose bzw. die Atmung ist in vier Teilabschnitte unterteilt: Glykolyse, Citrat-Zyklus, Atmungskette und oxidative Phosphorylierung.

Bei der Glykolyse wird zunächst Energie durch ATP auf Glucose übertragen und das Molekül auf diese Weise aktiviert. Die aktivierte Glucose wird in zwei C₃- Moleküle gespalten.

Formel für Glycolyse (SCHOPFER 2006)⁴:



Es entstehen zwei Moleküle Pyruvat (3 C-Atome) und einige wenige Elektronen (e-) und ihre zugehörigen Protonen (H+). Unter aeroben Bedingungen wird das Pyruvat in den Citrat-Zyklus eingespeist.

Zunächst wird jedes Pyruvat-Molekül decarboxyliert (d.h. Kohlendioxid wird abgespalten) und anschließend oxidiert. Hierbei entstehen zwei Moleküle NADH.

⁴ NAD steht hierbei für „Nicotinamid-Adenin-Dinukleotid“ und P für „Phosphor“

Bei dieser exergonischen Oxidationsreaktion wird ein Molekül NAD^+ zu $\text{NADH} + \text{H}^+$ reduziert (HEß 1999). Zusätzlich wird je ein Molekül CO_2 freigesetzt. Im nächsten Schritt entstehen zwei Moleküle FADH_2 (FAD = Flavin-Adenin-Dinukleotid) und sechs Moleküle NADH .

Im Citrat-Zyklus werden die Reste des Glukosemoleküls vollständig zu Kohlendioxid und Wasser abgebaut.

Der anschließende Weg wurde durch SINHA (2004) wie folgt beschrieben:

Nach dem Citrat-Zyklus ist das Glucosemolekül vollständig oxidiert. Ein Teil der Energie wurde zur Herstellung von ATP aus ADP und P_i ⁵ benutzt. Der überwiegende Teil der Energie bleibt jedoch in den Elektronen erhalten, die bei der Oxidation der Kohlenstoffatome auf NAD^+ und FAD übertragen wurden.

Im nächsten Schritt der Atmung werden diese energiereichen Elektronen des NADH und FADH_2 sukzessive auf Sauerstoff übertragen, der sich auf einem niedrigen Energieniveau befindet. Diese Übertragung wird durch die Atmungskette ermöglicht, die eine Abfolge von Elektronenüberträgern darstellt.

Die Elektronen werden am Ende der Atmungskette von Sauerstoff aufgenommen, der dann mit zwei Protonen zu Wasser reduziert wird. Da jeder Elektronenüberträger die Elektronen auf einem etwas niedrigeren Energieniveau bindet als sein Vorgänger, wird im Verlauf der Atmungskette Energie frei, die zum Aufbau des Protonengradienten verwendet wird. Dieser Protonengradient treibt die Bildung von ATP aus ADP und P_i an. Dieser Prozess wird oxidative Phosphorylierung genannt.

Ist kein Sauerstoff vorhanden, kommt der Citrat-Zyklus zum Erliegen. Dann kann das in der Glykolyse entstandene NADH nicht in der Atmungskette zu NAD^+ reoxydiert werden. Ohne diese Reaktion des NADH würde die Glykolyse rasch zum Erliegen kommen, denn der Zelle stünde bald kein NAD^+ als Elektronenakzeptor zur Verfügung (DEY et al. 1997).

Sauerstoff ist wichtig für die Funktionalität der Stoffwechselprozesse innerhalb der Pflanze. Die Sicherstellung der ausreichenden Versorgung mit diesem chemischen Element ist im aeroponischen System garantiert. Das System beeinflusst vor allem die Wurzel als Aufnahmeorgan. Um einen grundlegenden Einblick über die Wurzel im aeroponischen System zu bekommen werden einige wichtige Aspekte in den kommenden Kapiteln dargestellt.

⁵ anorganisches Phosphat, das als Phosphation im Cytoplasma gelöst ist (SINHA 2004)

2.3. Wurzel

In diesem Kapitel sollen die Aufgaben der Wurzel beleuchtet werden. Die Aufgabe Sauerstoff aufzunehmen soll genauer betrachtet werden. Unterschiedliche Erkenntnisse aus der Wissenschaft sollen Aufschlüsse über die Zusammenhänge von Sauerstoffverfügbarkeit und Pflanzenwachstum geben.

Weiterhin werden Grundlagen der Wurzelarchitektur dargestellt, welche im Versuch mit Hilfe der RSS diese verändert werden soll. Um den Einfluss der RSS auf die Wurzel messen zu können werden spezielle Messmethoden benötigt, hierfür sollen einige Beispiele aufgeführt werden.

2.3.1. Aufgaben der Wurzel (RAVEN et al. 2013)

Das Wurzelsystem ist ein wichtiger Teil der Pflanze – sie bewältigt einige wesentliche Aufgaben wie Wasser- und Nährstoffaufnahme oder die Verankerung der Pflanze im Boden (ENNOS & FITTER 1992, BARBER 1995, BAILEY et al. 2002).

Assimilate, gebildet in den photosynthetisch aktiven Teilen der Pflanze, werden über das Phloem ins Speichergewebe der Wurzel transportiert. Das von der Wurzel absorbierte Wasser und die Nährsalze wandern über das Xylem zu den oberirdischen Pflanzenteilen. Wurzeln synthetisieren zudem zahlreiche sekundäre Pflanzenstoffe, wie Nikotin, welches in den Blättern der Tabakpflanzen zu finden ist.

Weitere Aufgaben der Wurzeln (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002):

1. Austausch von Luft, angereichert mit CO₂ oder O₂, mit dem Spross
2. Fallweise Assimilation
3. Symbiose mit Pilzen zur besseren Aufschließung von Stoffen
4. Symbiose mit Bakterien zur Bindung von Luftstickstoff
5. Bildung von Wurzelknospen zur Erhaltung und Vermehrung der Pflanzen
6. Erschließung des Bodens bzw. des Luftraumes durch das Richtungswachstum der Wurzelspitzen

Von den vielen Aufgaben der Wurzel ist vor allem die Aufnahme von Sauerstoff interessant. Durch viele Untersuchungen ist bekannt, dass Sauerstoff eine positive Wirkung auf das Wurzel- und Pflanzenwachstum hat.

2.3.2. Bodendurchlüftung

Pflanzen können ohne Sauerstoff nicht überleben. Nur das Vorhandensein von Sauerstoff reicht jedoch noch nicht aus, um ein optimales Pflanzenwachstum zu gewährleisten. Die Ermittlung der optimalen Sauerstoffkonzentration im Boden wurde vielfach untersucht. Die Ergebnisse lassen Rückschlüsse zu, die sich auch auf das aeroponische System übertragen lassen

Es ist bekannt, dass die meisten Pflanzen im Boden Hohlräume benötigen, um Sauerstoff aufzunehmen oder Kohlenstoffdioxid abzugeben. Besonders Wurzelspitzen und aktiv wasseraufnehmende Wurzelabschnitte benötigen durchgehend Sauerstoff (GREGORY & NORTCLIFF 2013). Wird dieser Prozesse behindert, dann kommt es zu Einschränkungen im Wurzelwachstum.

BLACKWELL & WELLS (1983) stellten fest, dass Wurzeln bei Sauerstoffmangel dicker werden⁶. Hypoxie führt zu eingeschränkter Wurzelatmung, was die Transpiration, Mineralaufnahme und Biomasseproduktion reduziert (SOFFER et al. 1991 MORARD et al. 2000). Zudem beginnen Wurzeln an zu faulen (MÜLLER 1875).

Feinwurzeln beginnen ab einem O_2 -Partialdruck unter 1 kPa abzusterben (CANNEL 1997). Um die Funktionalität der Mitochondrien aufrechtzuerhalten benötigen die Wurzeln nur 0,05% der Sauerstoffkonzentration der Luft (DREW 1979). Wird die Sauerstoffkonzentration in der Rhizosphäre erhöht, steigert sich die Atmungsrate der Wurzelspitzen, dies ist besonders effektiv, da die Atmung dort 15 mal höher ist als in anderen Wurzelteilen (LUXMOORE et al. 1970). Laut KUTSCHERA (2010) und HELLRIEGEL (1883) verzweigen sich Wurzeln wesentlich stärker in besser durchlüfteten Bodenschichten. Nach ARNOLD & HOAGLAND (1940) ist das durchschnittliche Wurzelgewicht bei Tomaten in durchlüfteten Nährlösungen größer als in nicht durchlüfteten. MOHR (1978) stellte in den oberen Bodenschichten in

⁶ Wurzeln unter Sauerstoffmangel wiesen einen Wurzeldurchmesser von 0,66 mm auf. Der Wurzeldurchschnitt der Kontrolle betrug 0,39 mm (BLACKWELL & WELLS 1983).

einem Lehm Boden mit 13% Luftvolumen eine wesentlich größere Wurzeldichte fest als in einem Tonboden mit nur 6%.

Es hat sich gezeigt, inwiefern sich unterschiedliche Faktoren auf das Wurzelwachstum auswirken. Die Wurzel reagiert selbst mit eigenem Wachstum auf unterschiedliche Situationen. So entsteht eine räumliche Struktur – die Wurzelarchitektur.

2.3.3. Wurzelarchitektur

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit dem Zusammenhang zwischen Wurzelarchitektur und Pflanzenproduktivität in natürlicher Umgebung. Der räumliche Aufbau des gesamten Wurzelsystems wird als Wurzelsystemarchitektur bezeichnet (LYNCH 1995).

Diese Architektur hat Einfluss auf die Wasser- und Nährstoffakquisition (BOWMAN et al. 1998, DOUSSAN et al. 1998, LIAO et al. 2001, LAMBERS et al. 2006, SKAGGS & SHOUSE 2008), Kohlenstoffverteilung (BIDEL et al. 2000, COLL et al. 2008) und Anpassungsfähigkeit gegenüber Stress (Miller 1986, AL-GHAZI et al. 2003).

Unter natürlichen Bedingungen trifft die Wurzel auf verschiedenste Probleme (z.B. pH-Wert, Wasserverfügbarkeit). Angepasst an diese Bedingungen entwickelt sich eine spezielle Struktur der Wurzel, um den Rest der Pflanze mit den benötigten Nährstoffen zu versorgen und die Verankerung im Boden zu ermöglichen (ORMAN-LIGEZA et al. 2013).

Erst wenn genau bekannt ist, welche Gründe zu bestimmten Wurzelentwicklungen führen, können diese Erkenntnisse auf die RSS übertragen werden, um eine optimale Wurzelarchitektur zu gewährleisten. KUTSCHERA & LICHTENEGGER (2002) erfassten zahlreiche Wurzelarchitekturen.

Über die Hälfte der Photosynthese einer ausgewachsenen Pflanze wird für das Wurzelsystem und die damit verbundene Rohstoffsuche benötigt (FOGEL 1985). Dieser Energieaufwand kann im aeroponischen System verringert werden und somit die Effektivität der Pflanze steigern.

Im Bereich Züchtung ergeben sich dadurch völlig neue Wege (TRACY et al. 2010). Die Erforschung des Wurzelraumes kann zu einer weiteren grünen Revolution führen

(LYNCH 2007, DEN HERDER et al. 2010). Zum Vergleich: Pflanzen, die mit der ersten grünen Revolution in Verbindung gebracht werden (Reis, Getreide) liefern 50% der Kalorien, die der Mensch verzehrt (RICH & WATT 2013).

Bei *Zea mays* führte das erweiterte Wissen über Wurzelarchitektur bereits zu einer Steigerung des Ertrages (HAMMER et al. 2009, LYNCH & BROWN 2012). Bei gegen Phosphor-Mangel resistentem Reis (*Oryza sativa* cv Kasalath) ist das Protein (PSTOL1) verantwortlich für gesteigertes frühes Wurzelwachstum, zudem können die Pflanzen mehr Phosphor und andere Nährstoffe aufnehmen (GAMUYAO et al. 2012).

Für aeroponische Systeme wird die Wurzelzone ein wichtiges Züchtungsmerkmal, da Wurzelarchitektur genetisch beeinflusst werden kann. Beispielsweise besitzen phosphoreffiziente Genotypen der Bohne ein stark verzweigtes Wurzelsystem mit einer großen Anzahl von Wurzelspitzen (LYNCH & VAN BEEM 1993). Es zeigte sich zudem eine erhöhte Plastizität – das wirft die Idee von mitwachsenden, sich verändernden RSS auf, ein Konstrukt ähnlich wie ein Luftballon, welches über die Kulturdauer anschwillt.

Im Versuch soll die Auswirkung der RSS auf die Wurzel untersucht werden. Hierfür existieren verschiedene Hilfsmittel für die exakte Wurzelvermessung. Im Folgenden soll die Problematik der Wurzelvermessung näher erläutert werden.

2.3.4. Wurzelvermessung

Um sich ein genaues Bild von „the hidden half“ zu machen benötigt es ausgefeilter Messmethoden (ESHEL & BEECKMAN 2013). Dabei sollte sowohl die Wurzelarchitektur im aeroponischen System (in Verbindung mit RSS), als auch unter natürlichen Bedingungen untersucht werden. Besonders interessant für die Bestimmung des Wurzelvolumens ist die Vermessung mit Hilfe von Röntgen Micro-Computed Tomografie (μ CT).

Wurzeln erkunden auf der Suche nach Ressourcen ihre lokale Umgebung, ihr Verhalten ist dabei von vielen Faktoren abhängig (LYNCH 1995). Genaue Kenntnisse über diese Faktoren ermöglichen es bessere RSS zu entwickeln und ihren Nutzen zu maximieren. Bei Untersuchungen der Wurzel tritt häufig das Problem auf, dass entweder die Sichtbarkeit oder das Substrat (z.B. Agar (CLARK et al., 1999; FRENCH

et al. 2009) oder Gellan (CLARK et al. 2011)) nicht geeignet ist. Die häufigste Methode ist die Wurzeln in Substrat wachsen zu lassen und dann zu waschen (SMIT et al. 2000; GREGORY, 2006). Hierbei entstehen aber Schäden an der Wurzel selbst und die Architektur verschwindet gänzlich. Es wird eine Methode benötigt, welche zerstörungsfrei arbeitet – μ CT. Hierfür wurde das Programm RooTrak entwickelt (MAIRHOFER et al. 2012). Moderne μ CT Scanner verfügen über eine Auflösung von $<0.5\mu\text{m}$ (MAIRHOFER et al. 2012), das ermöglicht die Darstellung von Wurzelhaaren. Dem Erstellen exakter Wurzelbilder folgt die verbesserte Auswertung der Bildanalysen. Mit der Software RootflowRT zeigt sich ein weiterer Aspekt im Wurzelaufbau (VAN DER WEELE et al. 2003). Die Wachstumszone der Wurzel kann in zwei Bereiche geteilt werden – den apikalen, in welchem die Geschwindigkeit des Wachstums allmählich mit der Position steigt. Desweiteren gibt es eine subapikale Region, in welcher die Geschwindigkeit des Wachstums sehr stark mit der Position steigt. Die Position beschreibt die Markierung eines Organs auf einem Foto. Das Organ wird in gewissen Zeitabständen fotografiert und die Veränderung durch die Position der Markierung bestimmt – somit lässt sich die Geschwindigkeit berechnen (ERICKSON 1976, SILK 1992).

Für die weitere Verarbeitung und Auswertung der Daten eignet sich besonders ein dreidimensionales bzw. vierdimensionales Modell. Für die Erstellung eines dreidimensionalen Modells gibt es verschiedene Möglichkeiten: beispielsweise fraktale Beschreibung (LYNCH & NIELSEN 1996, FITTER & STICKLAND 1992), Entwicklungsregeln (VAN NOORDWIJK et al. 1994, DIGGLE 1988, PAGÈS et al. 2004), L-Systeme (PRUSINKIEWICZ, & LINDENMAYER 1990, SHIBUSAWA 1992) oder Greenlab (LEITNER & SCHNEPF 2009, ZHANG 2006). Nach Möglichkeit soll für die Versuchsauswertung ein derartiges Modell verwendet werden.

Die Wurzeln haben viele verschiedene Aufgaben, von denen einige unwichtig (z.B. Verankerung) und andere wichtig (z.B. Aufnahme von Sauerstoff) für die Aeroponik sind. Bei der Bearbeitung dieser Aufgaben kann man durch Veränderung verschiedene Faktoren (z.B. Temperatur) die Pflanze beeinflussen. Dieser Erkenntnisse lassen sich mit Hilfe exakter Messmethoden (z.B. μ CT) darstellen. Mit Hilfe von drei- bzw. vierdimensionalen Modelle lässt sich die Wurzelarchitektur rekonstruieren und untersuchen, es ergeben sich somit neue Möglichkeiten in Forschung und Züchtung. Im Versuch soll die Wurzel von *Lactuca sativa* durch RSS

manipuliert werden. Um dem Leser einen Einblick in die Kultur zu geben, werden im kommenden Abschnitt einige Fakten zu *Lactuca sativa* aufgezählt.

2.4. Artbeschreibung *Lactuca sativa*

Als Versuchspflanze wurde *Lactuca sativa* L. gewählt. *Lactuca sativa* L. bzw. Salat gehört der Familie der Korbblütler (*Asteraceae*) an. Die grüne, ein- bis zweijährige Pflanze ist selbstbefruchtend, lässt sich optimal in hydroponischen Systemen kultivieren und ist zudem einfach zu handhaben. *Lactuca sativa* ist gewissermaßen ein Selbstläufer, der unter optimalen Bedingungen keine Aufmerksamkeit benötigt. Zudem ermöglicht die Kulturzeit (ca. 30 Tage) eine schnelle Wiederholung der Teilversuche.

Die auch als Gartensalat bezeichnete Kulturpflanze ist schon seit 2500 Jahren bekannt. Die Nutzung der Salatblätter als Gemüse ist erst aus dem antiken Griechenland überliefert (KRUG & BENDER 2002).

Als Salat werden die folgenden Varitäten und Anbauformen von *Lactuca sativa* L. gehandelt: Kopfsalat (Butterkopf- und Eissalat), Romana-, Blatt- bzw. Schnitt- bzw. Pflücksalat und als Sonderanbauform Baby leaf. Die bekanntesten Arten sind der herkömmliche Kopfsalat, der Eissalat, der Römische oder Spargelsalat (CHEERS 2003). Unter natürlichen Verhältnissen blüht *Lactuca sativa* L. von Mai bis August. Ursprungsgebiete für Salat sind Asien, Ägypten und das Bergland von Ostafrika (HEGI 1906, TITTEL 1986, KÖRBER-GROHNE 1987).

Die Species *L. sativa* ist als Wildform unbekannt (HELM 1954). Als Ausgangsform von *Lactuca sativa* L. wird *Lactuca serriola* L. (Wilder Lattich, Kompass-Lattich) angenommen (ZANDER & ERHARDT 2008), aus der sich auf dem Wege der Mutation und Bastardierung mehrere Formen der Art *Lactuca sativa* L. mit seiner einheitlichen Chromosomenzahl von $n = 9$ gebildet haben.

Die theoretischen Grundlagen und Zusammenhängen innerhalb der Aeroponik reichen über die dargestellten Sachverhalte hinaus, so wäre auch eine Untersuchung der Nährstoffaufnahme im Vergleich zu anderen System möglich. Für den Versuch im Zuge der Arbeit wurden das aeroponische System, der Sauerstoff in der Pflanze und die Wurzeln als Schwerpunkt betrachtet. Es hat sich gezeigt, dass ein wichtiger

Aspekt der Aeroponik die hohe Sauerstoffverfügbarkeit ist. Dieser Sauerstoff wird von der Pflanze genauso benötigt wie beispielsweise Wasser. Es wurde dargestellt, inwiefern die Wurzeln von Sauerstoff beeinflusst werden und mit eigenem Wachstum darauf reagieren können. Für die Messung dieses Wachstums gibt es verschiedene Ansätze und moderne Messmethoden. Die im Versuch verwendeten Messmethoden sollen im kommenden Kapitel erläutert werden.

3 Material und Methoden

Das Kapitel Material und Methoden dokumentiert alle Zusammenhänge der Versuchsdurchführung. Zu Beginn wird der Versuchsaufbau und das verwendete aeroponische System vorgestellt. Es folgt die Beschreibung des Versuchsaufbaus. Das Kapitel 3 endet mit der Einführung in die verwendeten Messmethoden. Für nachfolgende oder ähnliche Versuche kann diese Beschreibung als Anhaltspunkt genutzt werden.

3.1. Die Gewächshauskabine

Durchgeführt wurde der Versuch im Versuchsgewächshaus der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden in Dresden – Pillnitz. Der Standort befindet sich etwa 115 m über NN. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 9,1 °C (laut Wetterstation des GWH).

Um über die gesamte Dauer der Versuchsreihe gleiche Bedingungen zu gewährleisten wurde das System in einer Dunkelkammer (Kabine 1.1) aufgebaut. Die 24 m² große Kammer ist mit lichtundurchlässiger Folie komplett isoliert, um absolute Dunkelheit zu gewährleisten. Die Kabine ist ausgestattet mit einer Sprühnebelanlage, Assimilationslicht, Kühlung, Insektenschutzgitter, Düngereinspeisung und Energieschirm. Das Betreten der Kabine war nur autorisiertem Personal gestattet, sodass kaum Klimaveränderungen auf Grund von Durchgang zustande kamen. Die genauen Werte für Außentemperatur, CO₂-Konzentration, Kammerinnentemperatur und –luftfeuchtigkeit sind der Anhangs-CD zu entnehmen.

Als Grundlage für die Einstellungen und Kulturführung wurde das Cornell CEA Hydroponic Lettuce Handbook (BRECHNER & BOTH 2013) verwendet.

Anschließende Einstellungen wurden über die zentrale Steuerungseinheit des Gewächshauses vorgenommen. Die Temperatur wurde auf 21 °C am Tag, 19 °C in der Nacht, eingestellt. Optimal für Salat am Tag sind 24 °C (BRECHNER & BOTH 2013), die fehlende Wärme konnte von den Natriumdampflampen kompensiert werden, da diese zusätzliche Wärme erzeugen und die Trays aufheizen.

Für die Beleuchtung sorgte jeweils eine Natriumdampf Lampe pro Nische. Die genaue Bezeichnung der Lampen lautet: BY150P 1xSON400W IC IP65 von der Firma Philips Deutschland GmbH. Die Lampen haben eine Leistung von 400 W. Die Trays wurden so ausgerichtet, dass jede Pflanze möglichst $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR (photosynthetically active radiation) ergibt, orientiert an NEUMANN et al. 2014. In Abbildung 2 wird die gemessene PAR pro Pflanzloch dargestellt. Der Farbverlauf stellt niedrige Werte grün, mittlere Werte gelb und hohe Werte rot dar.

Lactuca sativa L. gehört zu den Langtagpflanzen (WONNEBERGER 2004), deshalb wurden die Lampen täglich für 16 h eingeschaltet.

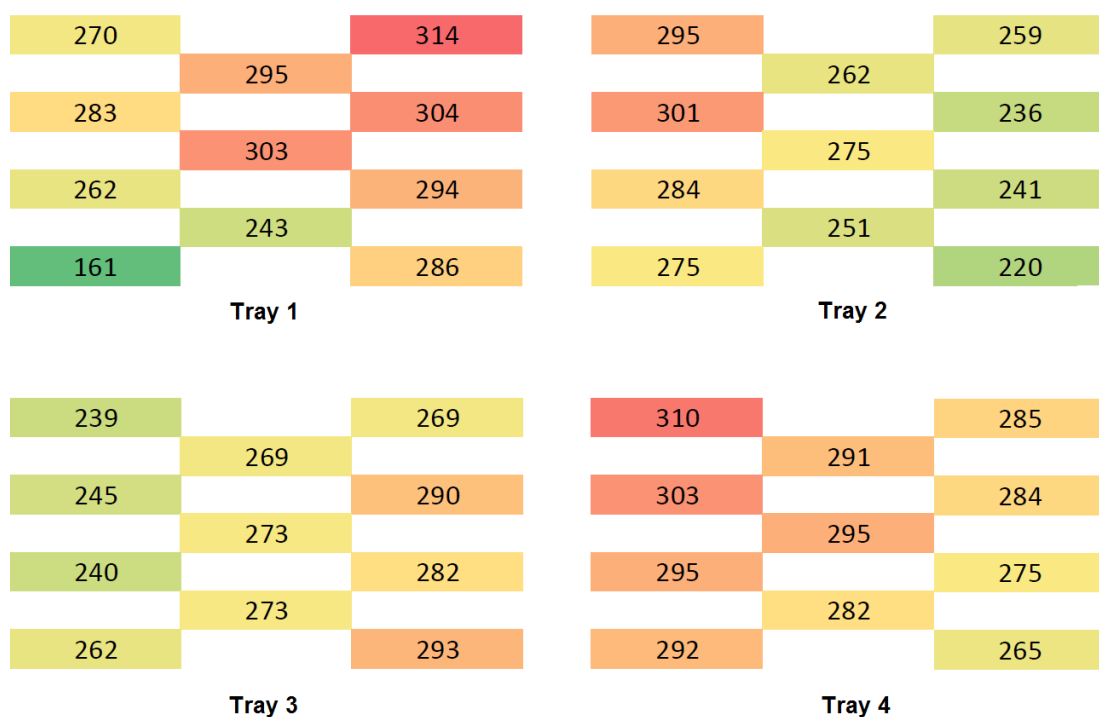


Abbildung 2: Gemessene PAR für die einzelnen Pflanzlöcher der Trays in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Die Kühlung in der Kabine erfolgte über die Lüftung oder Klimaanlage. Sobald die Kühlung über die Lüftung nicht mehr ausreichend war, um die eingestellte Temperatur zu halten, wurde die Klimaanlage eingeschaltet und die Lüftung geschlossen. Um zu verhindern, dass die dadurch entstandene Zugluft die Pflanzen zu sehr beeinträchtigt, wurden zusätzliche Trennwände aufgestellt. Die vier Trays befanden sich somit in zwei abgetrennten Nischen. Um Probleme wie z.B. Kaltluftstau zu umgehen wurden zwei Nischen ausgesucht, welche ein ausgeglichenes Mikroklima aufwiesen. Die rel. Luftfeuchtigkeit wurde auf 80% eingestellt

3.2. Das aeroponische System

Die Versorgung mit Nährlösung kam aus einem 30 Liter Tank, welcher sich am Boden unter den Trays befand. Die Ausgangsnährlösungen A und B wurden zu gleichen Teilen gemischt. Die genaue Zusammensetzung der Stammlösungen A und B beschreibt Tabelle 1. Die Nährlösung aus A und B wurde dann mit Leitungswasser im Tank vermischt.

Zu Beginn wurde die Nährlösung auf einen pH-Wert von 5,5 und einem EC-Wert (electric conductivity) von 0,8 justiert. Die Tabelle Anhang EC- und pH-Wert (S. 85) zeigt die jeweiligen Einstellungen. Die Nährlösung wurde alle zwei Tage gemessen. Um bei der Berechnung des Durchschnittes Abweichungen zu verhindern wurde für die Tage, bei denen keine Messung durchgeführt wurde, der Mittelwert zwischen dem vorherigen und nachfolgenden Tag gebildet.

Zur Regulierung der Nährlösung wurde für eine Steigerung des EC-Wertes ein Gemisch aus A und B (Tabelle 1) zu gleichen Teilen in den Tank gefüllt – zur Senkung wurde die Nährlösung im Tank mit Leitungswasser verdünnt. Bei Abweichungen des pH-Wertes wurde der Nährlösung Salpetersäure oder Kaliumhydroxid zugegeben.

Der EC-Wert wurde mit dem Leitfähigkeits- und TDS-Handmessgerät Hanna HI 99301 ermittelt. Der pH-Wert wurde mit dem pH AGRAR 2000 (Stelzner®) gemessen. Die Temperatur der Nährlösung entsprach der Kabinentemperatur.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Stammlösung

Mittel	chemische Formel	Menge je 100 l Stammlösung
A		
Calciumnitrat (Kalksalpeter)	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	2,36 kg
Kaliumnitrat	KNO_3	3,37 kg
Eisenchelat	Fe-EDDHA	0,12 kg
B		
Kaliumnitrat	KNO_3	3,4 kg
Magnesiumsulfat (Bittersalz)	MgSO_4	1,91 kg
Kaliumhydrogenphosphat (Monokaliumphosphat)	KH_2PO_4	2,62 kg
Salpetersäure	HNO_3	0,2 l
Mikronährstoffe		
Mangansulfat	MnSO_4	20 g
Borax (Natriumtetraborat)	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	20 g
Kupfersulfat	CuSO_4	2 g
Zinksulfat	ZnSO_4	5 g
Ammoniummolybdat-4-Hydrat	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1 g

Die Pumpen versorgten über das Leitungssystem die Trays mit der Nährlösung (Abbildung 3, Bild B). Hierbei wurden Pumpen der AFT GmbH & Co. KG verwendet. Für die Steuerung der Pumpen wurde eine Zeitschaltuhr zwischengeschaltet, welche die Pumpen alle fünf Minuten für 10 Sekunden anschaltete. Die Pflanzen hatten somit 3,45% der Kulturzeit Kontakt zur Nährlösung. Die Nebeldüsen (ECO, Gewinde M5, Bohrung 0,3 mm) der Firma AFT GmbH & Co. KG zerstäubten die Nährlösung im Tray, sodass ein feines Aerosol entstand. Die Rückflüsse aus den Trays wurden aufgefangen, gefiltert und in den Tank zurückgeführt. Der Filter bestand aus zwei Laken Fließ im Rückfluss (Abbildung 3, Bild D) und einem handelsüblichen Stütz-Kniestrumpf am Zufluss (Abbildung 3, Bild C).

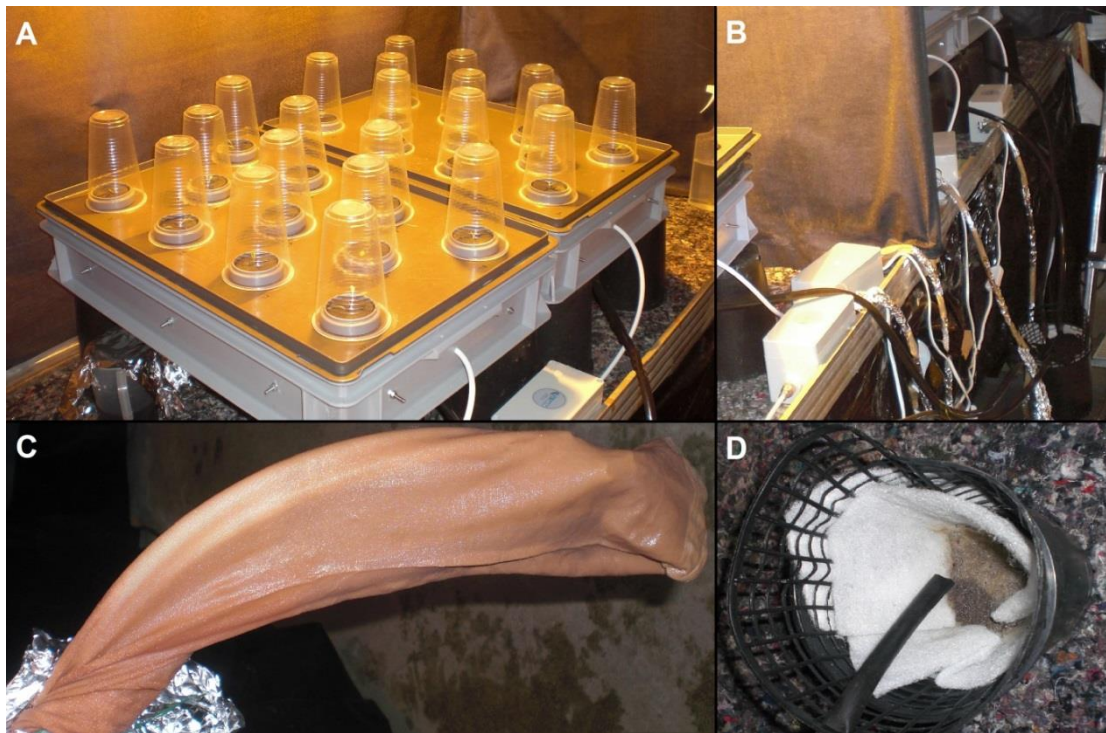


Abbildung 3: A: Tray 3 und 4; B: Pumpen und deren Anschlüsse; C: Filter im Tank; D: Filter vor Tank

Der gesamte Bereich, indem sich die Nährlösung befand, wurde vom Licht abgeschottet, um Algenbildung zu verhindern. Durchsichtige Schläuche wurden deshalb mit Alufolie isoliert.

3.2.1. Traydesign

Die Basis Pflanzeinheit des Systems bildeten Euro-Stapelkisten der Firma Kaiser + Kraft (Abbildung 3, Bild: A). Die Außenmaße der Trays bzw. Kisten belaufen sich auf 600x400x120 mm (Länge x Breite x Höhe). Die genauen Maße und Positionen der Düsen sind in der Abbildung 4 dargestellt. Die Düsen befanden sich in einer Höhe von 45 mm. Die Düsen wurden so im Tray verteilt, dass möglich wenig Überschneidung herrschte und der Nebel gleichmäßig verteilt werden konnte.

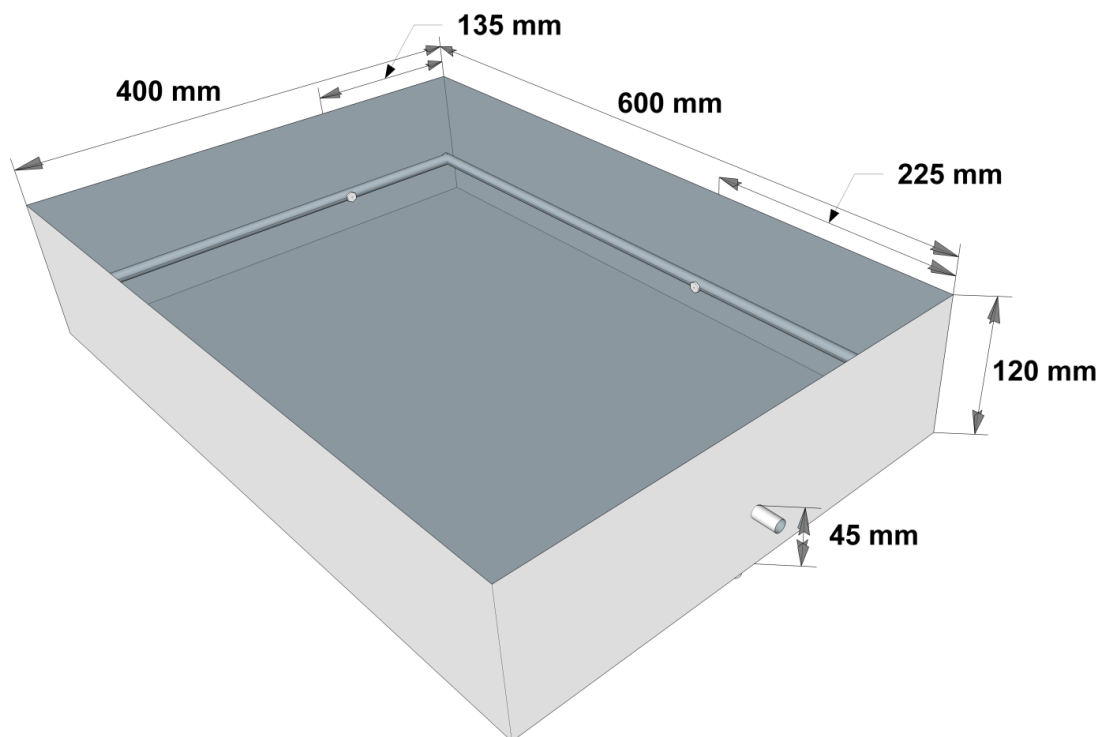


Abbildung 4: CAD Zeichnung eines Trays

Im zugehörigen Deckel befand sich die Halterung für die Pflanzen. Die Abbildung 5 zeigt die Pflanzenhalterung (PSS). Als Kopf diente die Steckverbindung eines 45 mm PVC Rohres mit Gummiring. In diesen wurde ein Neoprenring mit 45 mm Durchmesser und 13 mm Höhe gesteckt. Der Gummiring verhindert zusätzlich das Abrutschen des Neoprenrings.

Für den Kopf wurde ein 52 mm Loch in den Deckel der Euro-Stapelkisten gebohrt. Der Abstand zwischen den Mittelpunkten der Löcher betrug 13,2 cm in der Breite und 15 cm in der Länge. Pro Tray wurden Löcher für 11 Einzelpflanzen angelegt (Abbildung 3, Bild A). Die hohe Pflanzendichte (44 Pflanzen/m²) wurde gewählt, um Verluste auszugleichen und generell mehr Pflanzen für die Auswertung zu erhalten.

Die Pflanzen sollten zudem nicht voll auswachsen, weshalb sie auch weniger Platz benötigten.

Die PSS wurde lediglich zusammengesteckt und konnte dadurch leicht gereinigt werden. Überschüssige Nährlösung konnte über den Abfluss aus dem Tray entfernt werden.

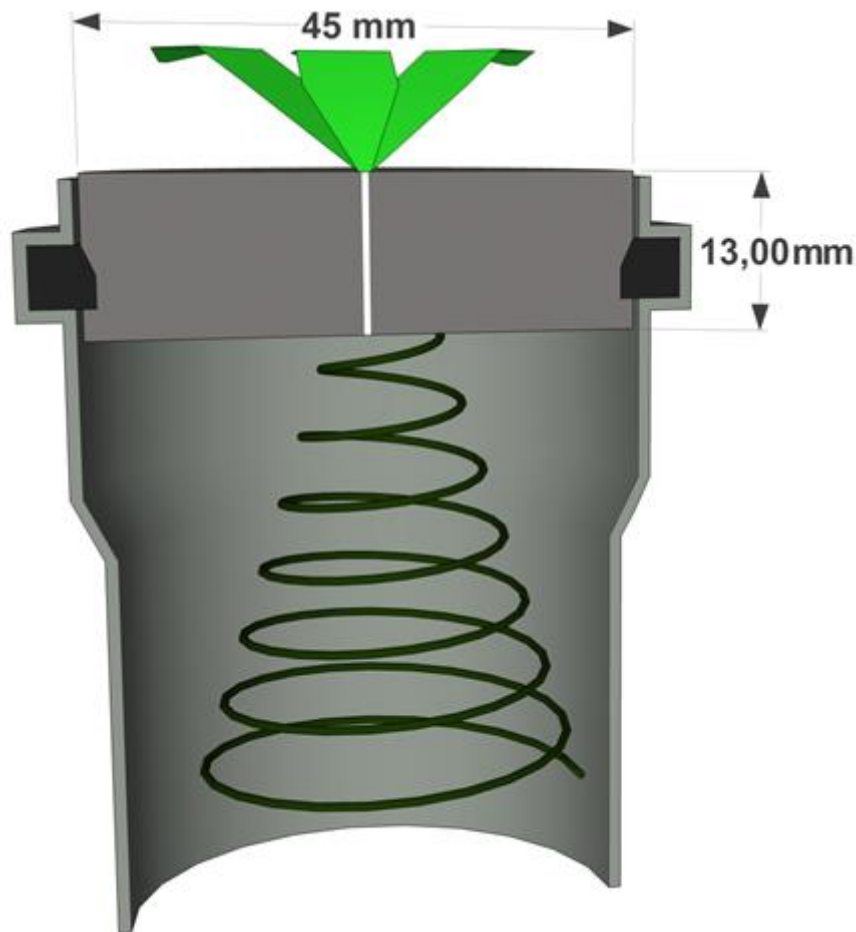


Abbildung 5: Querschnitt PSS

3.2.2. Root Support Structures

Die Befestigung der RSS erfolgte immer am Neoprenring. Die beiden Objekte wurden mittels Bindendraht verbunden. Für die Formen wurde Bindendraht, Gartendraht (\varnothing 2 mm), Kunststoffgitter (Maschen = 0,5 cm) und Polyesterstoff verwendet. Die handgefertigten RSS variierten leicht in Form und Größe. Die RSS stehen für die unterschiedlichen Varianten des Versuches

Die Bezeichnungen der Varianten stellen nur grob die geometrische Form dar, sie dienen lediglich der Orientierung. Die Varianten wurden wie folgt bezeichnet:

- Kontrolle (A)
- Kegel (B)
- Dreieck (C)
- Halbkugel (E)
- Pyramide (F)
- Quadrat (G)

Die Kontrolle repräsentiert die Normalbedienungen. Sie verfügt über keine RSS und liefert die Vergleichswerte.

3.2.2.1. Die Variante Kegel (B)

Die Kegelform ergibt im Optimalfall, d.h. bei präziser Herstellung der Form, aus der Vogelperspektive betrachtet, eine geschlossene Kreisform (siehe Abbildung 6). Mit jeder Ebene, die die Wurzeln während ihres Wachstums erreichen, werden sie gezwungen die Richtung zu ändern – ähnlich wie bei einem Galtonbrett⁷. Eine optimale Verteilung der Wurzel würde zustande kommen, wenn die Hälfte der Wurzeln innerhalb und die restlichen Wurzeln außerhalb der RSS wachsen würden. Somit würde eine gleichmäßige Auffächerung des Wurzelsystems entstehen. Für diese Variante wäre die Anordnung der Düsen direkt unterhalb optimaler gewesen, dann würde sich das Aerosol vom Inneren des Kegels heraus verteilen. Die durchschnittlichen Werte betragen für die Achse 10 cm und den Radius der Grundfläche 3,5 cm. Für die gesamte Form wurde Gartendraht verwendet.

⁷ Ein Galtonbrett ist ein mechanisches Modell zur Demonstration und Veranschaulichung der Binomialverteilung. (GALTON 1889)

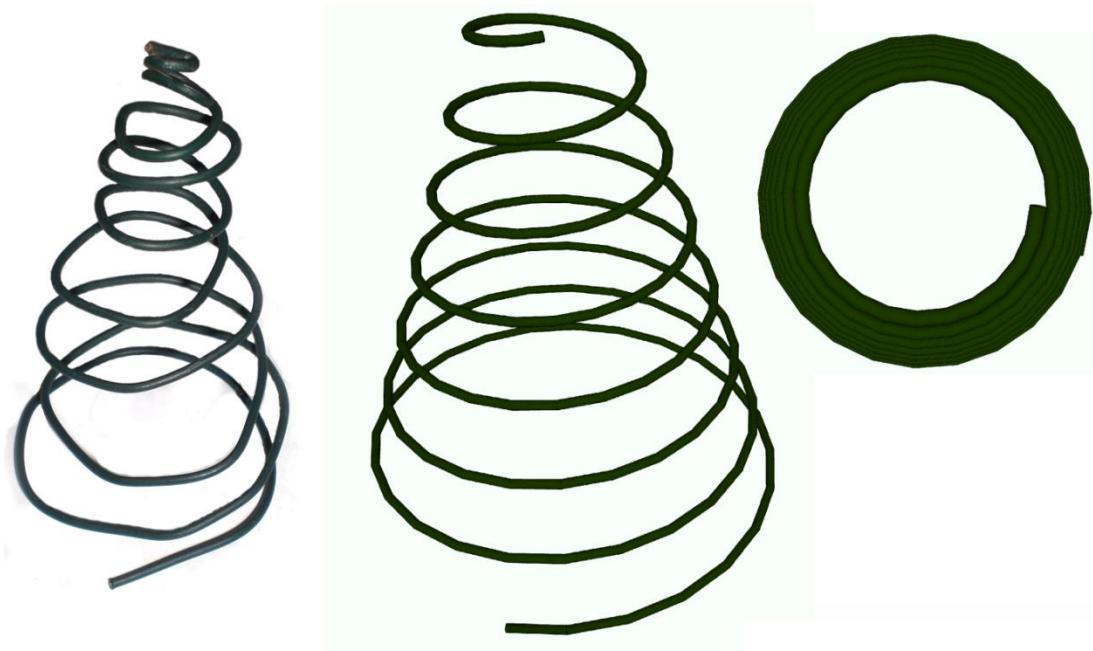


Abbildung 6: Foto Kegel (links); CAD Zeichnung Kegel (Mitte); Draufsicht CAD Zeichnung Kegel (rechts)

3.2.2.2. Die Variante Dreieck (C)

Die Form der RSS erinnert an die A-Frame Variante von aeroponischen Systemen. Die Idee dahinter war, dass die Dreiecke hintereinander platziert werden und eine Art Tunnel bilden, durch den sich das Aerosol optimal verteilen konnte. Zudem ist die Form einfacher zu gestalten als z.B. die Kegelform. Die RSS kombinierte sich aus Gartendraht, Kunststoffgitter und Polyesterstoff. Der Stoff wurde mittels Flüssigleim über die Spitze des Dreiecks gezogen, um zu verhindern, dass Wurzeln direkt durch die RSS durchwuchsen. Zweidimensional betrachtet hatten die Katheten eine Länge von 7 cm und die Hypotenuse eine Länge von 8 cm. Die Tiefe beträgt 5 cm. In Versuch 4 wurde diese RSS modifiziert – die Tiefe wurde etwas erhöht auf 7 cm und der Polyesterstoff wurde entfernt (siehe Abbildung 7).

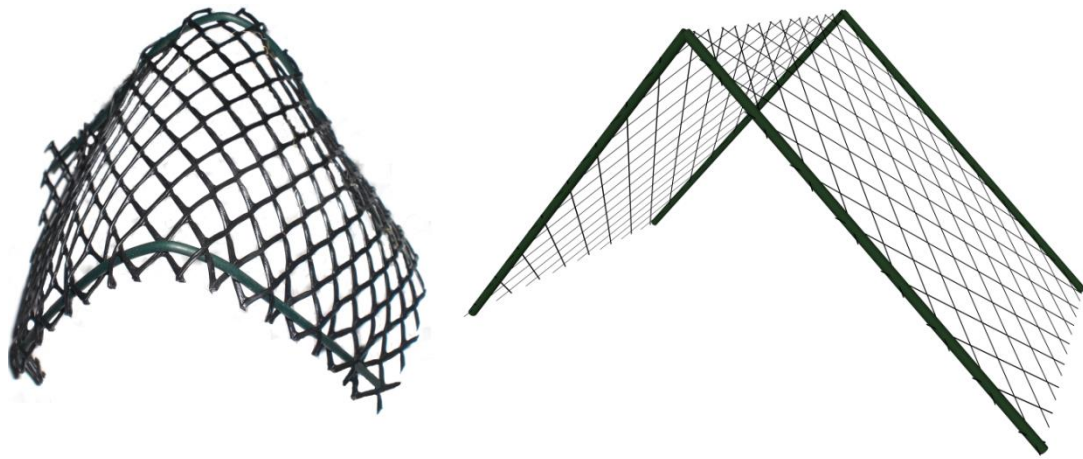


Abbildung 7: Foto Dreieck (links); CAD Zeichnung Dreieck (rechts)

3.2.2.3. Die Variante Halbkugel (E)

Die Halbkugel (Abbildung 8) sollte den Wurzeln ermöglichen sich wie eine Kuppel (ähnlich wie ein Wigwam) auszubreiten. Die Struktur sollte vor allem von unten eine günstige Angriffsfläche für das Aerosol bieten. Die durchschnittlichen Werte der Halbkugel betrugen für die Achse 5 cm und den Radius der Grundfläche 3,5 cm. Für die Herstellung wurde ausschließlich Bindedraht verwendet.

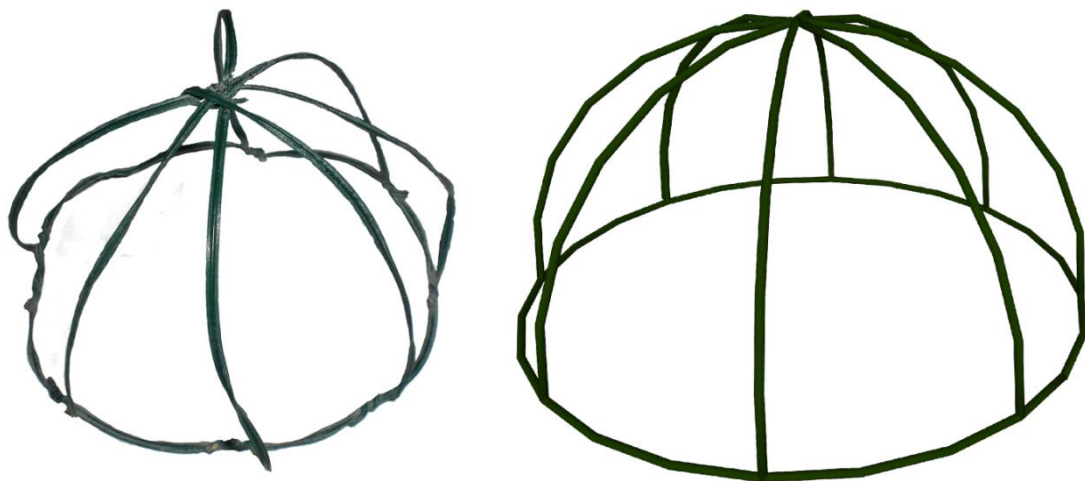


Abbildung 8: Foto Halbkugel (links); CAD Zeichnung Halbkugel (rechts)

3.2.2.4. Die Variante Pyramide (F)

Inwiefern kleinere RSS die Wurzeln beeinflussen, sollte mit dieser Variante untersucht werden (Abbildung 9). Die Pyramide bestand aus zwei 5 cm langen Drähten (Gartendraht), welche gekreuzt übereinander gelegt und miteinander verbunden sind.

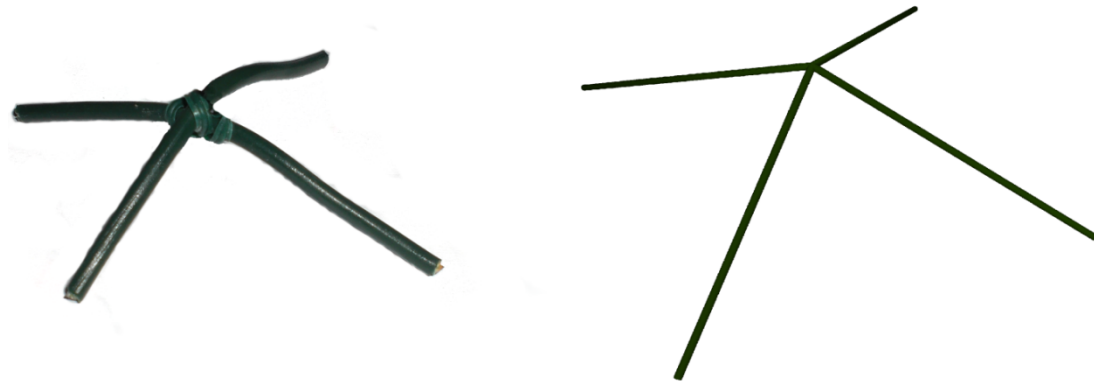


Abbildung 9: Foto Pyramide (links); CAD Zeichnung (rechts)

3.2.2.5. Die Variante Quadrat (G)

Das Quadrat (Abbildung 10) bestand lediglich aus 7 x 7 cm Kunststoffgitter. Die Fläche hing waagrecht im Tray – parallel zum Neoprenring (Abstand ca. 3 cm).

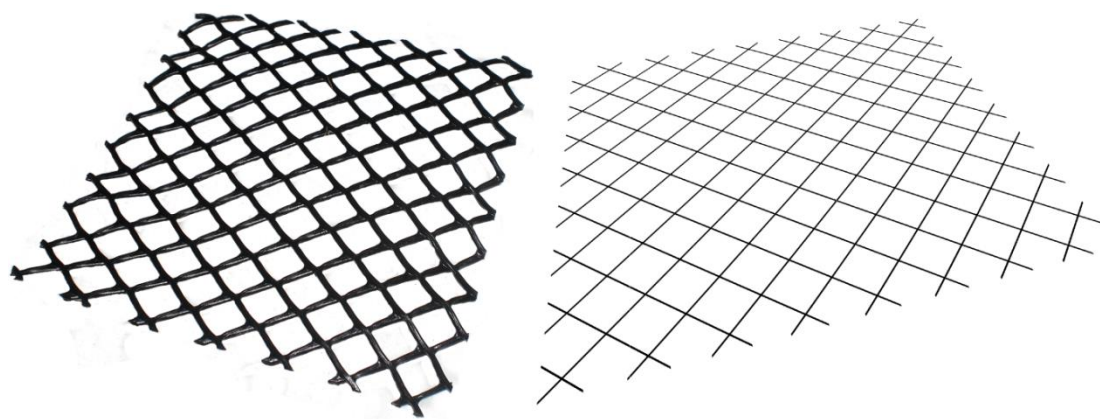


Abbildung 10: Foto Quadrat (links); CAD Zeichnung Quadrat (rechts)

3.3. Versuchsablauf

Der Gesamtversuch wurde in vier Teilversuche untergliedert. In Abbildung 11 sind die einzelnen Meilensteine dargestellt.

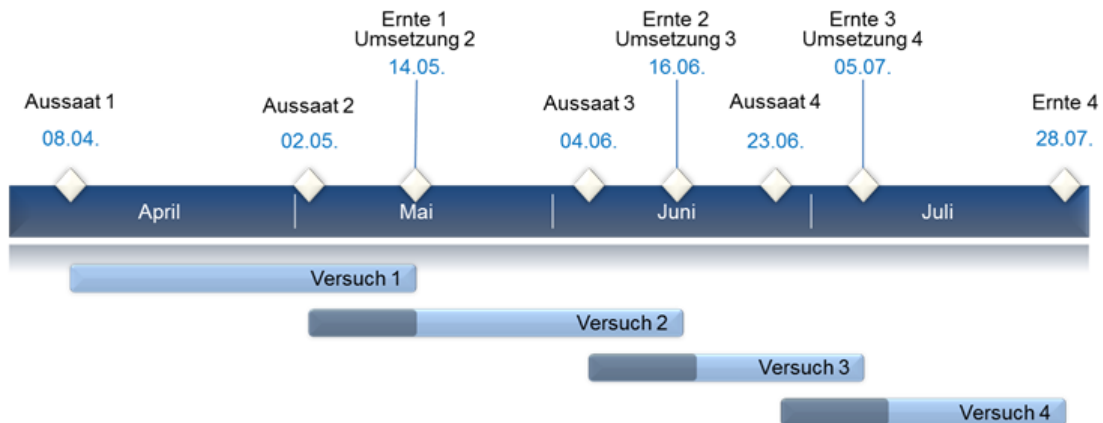


Abbildung 11: Timeline des Gesamtversuches

Für die Versuche wurde Saatgut der Rijk Zwaan Welver GmbH verwendet. Der Multiblatt-Kopfsalat ‘Archimedes RZ’ ist für den ganzjährigen Feldanbau geeignet. Er verfügt über sehr hohe Resistenzen. Er eignet sich für die Pflanzung im Freiland von Ende März bis Mitte August bei etwa 13 – 16 Pflanzen pro m². Das Saatgut ist in pillierter Form verwendet worden (RIJK ZWAAN 2011).

Eine optimale Keimung erfolgt zwischen 16 – 18 °C (BIGLER SAMEN AG 2014).

Versuch 1

In Versuch 1 erfolgte die Anzucht im System. Hierfür wurden in jeden Neoprenring zwei Saatkörner gesteckt. In den ersten 14 – 16 Tagen wurden die Pflanzlöcher zusätzlich mit einem Becher abgedeckt und täglich mit Leistungswasser besprüht, um genügend Feuchtigkeit zu garantieren. Bei den restlichen Versuchen wurde das Saatgut in Torfsubstrat D 400 der Firma Stender ausgesät. Das Saatgut bzw. die daraus entstandenen Keimlinge verblieben 12 Tage in Multitopfpaletten bevor sie in das aeroponische System überführt wurden. Die Aussaat außerhalb des Systems ermöglichte eine Zeitersparnis, die genutzt werden konnte, um mehr Versuchsdurchgänge durchzuführen.

Versuch 2

Versuch 2 konnte bei Außentemperaturen zur Keimung gebracht werden (Ø 13 °C).

Versuch 3

Versuch 3 wurde zuerst für 5 Tage im Kühlhaus (8 °C) eingelagert und danach in Kabine 1.1 untergebracht. Eine zusätzliche Partie für Versuch 3 wurde in einer anderen Gewächshauskabine ausgesät (Ø 22 °C). Aus den beiden Partien wurden phänologisch gleiche Pflanzen für den Versuch verwendet.

Versuch 4

Versuch 4 wurde in einem Weintemperierschrank der Firma Severin (KS 9883) bei 16 °C ausgesät.

Bei allen Versuchen wurden nach 12 Tagen wurden phänologisch gleiche Pflanzen ausgewählt und in das aeroponische System eingepflanzt. Zum Zeitpunkt des Verpflanzens verfügten die Pflanzen über zwei Keimblätter und waren etwa 2 cm hoch (BBCH 10).

Die Pflanzen wurden in dem Neoprenring positioniert, sodass die Wurzel komplett in den Bereich des Aerosols hineinhing. Der Vegetationspunkt ragte leicht aus dem Neoprenring heraus. Für die folgenden zwei Tage wurden zusätzlich farblose Plastiktrinkbecher verkehrt herum auf die Pflanzen gestellt, um eine höhere Luftfeuchtigkeit zu gewährleisten (Abbildung 3, Bild A).

Versuchsanordnung

Die Verteilung der einzelnen Pflanzen ist der Abbildung Anhang Versuchsanordnung (S.87) zu entnehmen. Die Varianten wurden frei randomisiert auf die Trays aufgeteilt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Verteilung relativ gleichmäßig war. Diese Aufteilung wurde während aller vier Versuche aufrechterhalten. Der Grund hierfür war die Überlegung, in allen Versuchen die Pflanzen derselben Position zu untersuchen, um Unterschiede auf Grund der Position zu finden. Die Umsetzung wurde aufgrund der geringen Datenmenge im Versuchsverlauf verworfen.

3.4. Messmethoden

Die Ernten erfolgten immer in den gleichen Teilschritten. Am Anfang wurde der Gesamtbestand fotografiert. Darauf folgte die Entnahme der Einzelpflanzen. Dafür wurde im jeweiligen Tray die Pumpe abgestellt und die Nährlösungszufuhr gestoppt, damit die Wurzeln leicht abtrocknen konnten. Mit dieser Maßnahme sollten Extremwerte wegfallen, die entstehen, wenn die Wurzeln gerade erst besprüht wurden und keine Zeit zum Abtropfen gehabt hatten.

Die Symbiose aus Wurzel und RSS wurde ebenfalls per Foto festgehalten. Dann folgte die Trennung der Pflanze von PSS und RSS. Die Wurzeln wurden vom Rest der Pflanze abgetrennt. Die Abtrennung erfolgte am Wurzelhals (Abbildung 12).

Die Wurzeln wurden ausgebreitet und fotografiert. Für eine bessere Unterscheidung der Wurzeln wurde als Untergrund ein schwarzes Polyestertuch gewählt. Der obere Teil der Pflanze wurde komplett zerpfückt. Die Blätter wurden gezählt und nebeneinander auf dem Neoprentuch platziert und fotografiert.

Im nächsten Schritt wurde die Frischmasse von Blatt und Wurzel gewogen (Feinwaage: Mettler Toledo XA 105 Dual Range). Die gesamte Ernte kam dann für 24 h bei 105 °C in einen Trockenschrank (vgl. BÖHM 1979). Zur Trocknung wurde der Kelvitron® t der Firma Heraeus verwendet.

Danach wurde das gesamte System gereinigt. Die Trays, RSS und PSS wurden mit warmen Leitungswasser und Spülmittel gereinigt. Die Schläuche und Pumpen wurden mehrfach mit Leitungswasser im „Leerlauf“ betrieben, um Nährlösungsreste zu entfernen. Die Filter wurden erneuert und eventuelle Schäden an der Isolierung ausgebessert. Im Anschluss wurde das System wieder in Betrieb genommen und die neuen Pflanzen eingesetzt.

Am Folgetag wurde mit einer Feinwaage (Mettler Toledo XA 105 Dual Range) die Trockenmasse gemessen. Die Bestimmung von Wurzelvolumen, Wurzellänge, Wurzelverzweigung und Blattfläche erfolgte mit Hilfe von Bildverarbeitung.

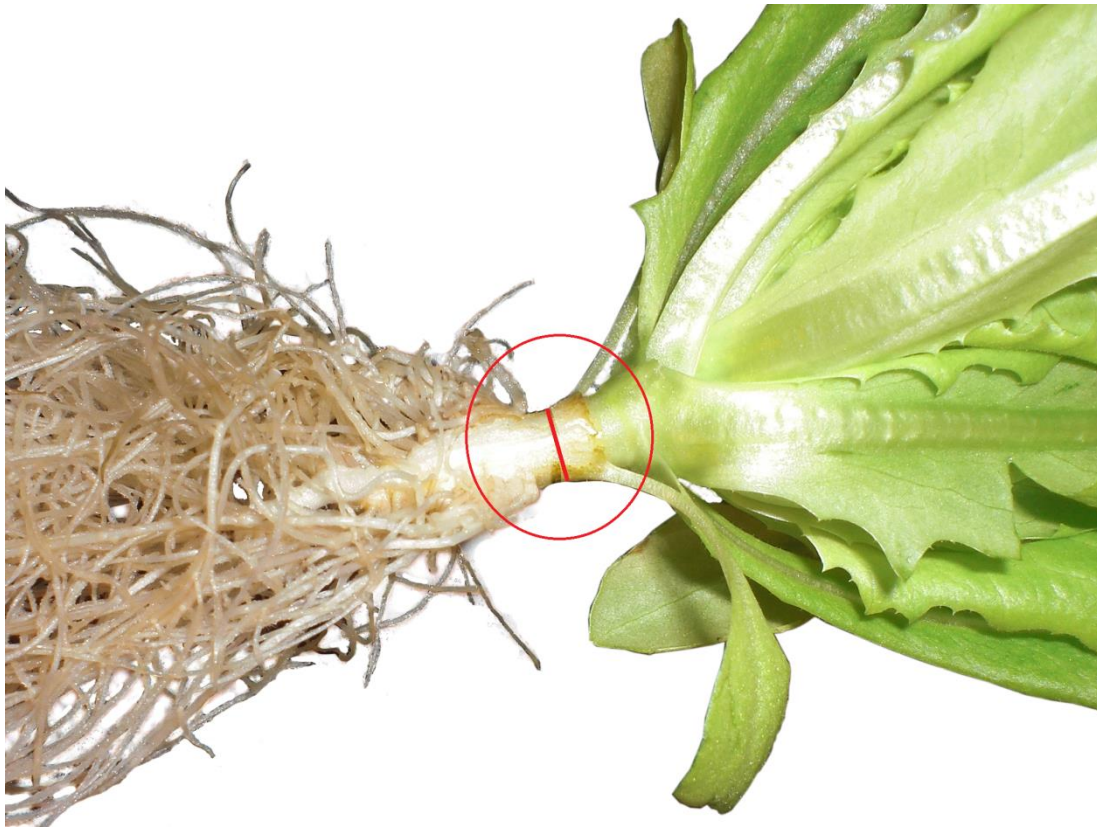


Abbildung 12: Schnittstelle (roter Kreis) zwischen Wurzel und Blatt

3.4.1. Blattfläche

Die einzelnen Pflanzen wurden Stück für Stück zerlegt. Die Blätter wurden separat mit der Blattunterseite nach oben nebeneinander ausgebreitet und fotografiert. Wichtig ist hierbei, dass sich ein Maßstab auf dem Bild befindet und die Bilder möglichst im 90° Winkel geschossen werden. Als Maßstab diente hierbei ein Zollstock.

Für die Bestimmung der Blattfläche gibt es verschiedenste Software. Die grundsätzliche Idee ist die Blätter auf einem einfarbigen Untergrund (z.B. weiß) zu fotografieren. Der weiße Hintergrund kann dann ausgeblendet werden und mit Hilfe eines Maßstabes auf dem Bild kann die Fläche der Blätter bestimmt werden (CHEN et al. 2010).

Bei den Salatblättern im Versuch trat das Problem auf, dass sich die Blattränder nach oben gewellt hatten. Da sich dies nicht verhindern lies, fiel die Entscheidung auf eine manuelle Messmethode.

Mit Hilfe der Bildverarbeitungssoftware CAD-KAS Bild-Vermessen 1.0 – Demoversion® wurden die Blätter vermessen. Die Software ermöglicht es Lienen auf ein Bild zu zeichnen und diese anhand des festgelegten Maßstabes zu messen. Die einzelnen Fotos wurden in die Software übertragen und dann manuell abgezeichnet. Die gewellten Blattränder wurden ebenfalls markiert. Somit ergab sich ein Polygon, dessen Fläche das Programm berechnete. Die Werte der einzelnen Polygone wurden summiert und dokumentiert.



Abbildung 13: Foto Blätter 04A43 (links); Ausschnitt Blattflächenmessung in CAD-KAS Bild-Vermessen® (rechts)

3.4.2. Wurzellänge und Wurzelverzweigung

Bildanalyseprogramme sind meist sehr speziell ausgerichtet. Das betrifft die Pflanzenart bzw. Wurzelart und auch die Eigenschaften der zu untersuchenden Bilder. Um ein solches Tool für eigene Auswertungen anwenden zu können, benötigt man meist exakt die gleichen Voraussetzungen für das Bildmaterial. Teilweise bedarf die Software noch Unterstützung vom Anwender, was bei einer geringen Anzahl von Bildern weniger ein Problem darstellt. Wird die Wurzel über einen längeren Zeitraum beobachtet und die Bilder automatisch erzeugt, dann können Schwierigkeiten auftreten (z.B. Auslastung Speicherkapazität auf Grund sehr hoher Datenmengen). Weiterhin ist darauf zu achten, dass keine Fremdkörper im Bild auftauchen. Flecken auf der Linse der Kamera oder auch Schmutz auf dem Hintergrund kann die Software verwirren. Bildbearbeitungssoftware kann hier Abhilfe schaffen (MANCUSO 2012).

Die Messungen für den Versuch erfolgten ähnlich wie bei der Blattfläche. Die Wurzeln wurden ausgebreitet, möglichst gleichmäßig verteilt und fotografiert. Auf diesem Foto wurde eine repräsentative Fläche von ca. 1 cm² ausgewählt.

Diese Fläche wurde dann mit CAD-KAS Bild-Vermessen® ausgewertet. Hierbei wurde manuell die Länge der Wurzeln bestimmt und die Wurzelverzweigungen gezählt. Anschließend wurde die Gesamtfläche, welche die Wurzel auf dem Bild einnimmt gemessen. Die beiden Flächen wurden in Relation gesetzt, d. h. die Werte aus dem 1 cm² wurden hochgerechnet und auf die Gesamtfläche übertragen.

Für die Vermessung von Wurzeln existiert auch verschiedene frei verfügbare Software, welche die gesamte Analyse automatisch ausführt. Die getesteten Programme (z.B. RhizoScan, RooTrak, RootSnap!, RootNav, Gia Roots, RootDetection) waren aber meist so speziell, dass sie nicht nutzbar für diese Auswertung waren. Die errechneten Werte waren oft unvollständig oder utopisch, sodass die Entscheidung auf die manuelle Variante fiel.

3.4.3. Wurzelvolumen

Das Wurzelvolumen bezeichnet in der Arbeit den Raum, den der Wurzelkörper innerhalb des Trays einnimmt. Ziel war es einen messbaren Wert zu finden, welcher die angestrebte Auflockerung durch die RSS darstellen kann. Dafür wurden die Wurzeln innerhalb der RSS vermessen. Diese Werte dienten als Grundlage für die Erstellung eines dreidimensionalen Körpers mit Hilfe eines CAD Programmes (SketchUp Pro 2014® Version 14.1.1282). Nachdem der Körper manuell konstruiert wurde, ermittelte die Software das Volumen des Körpers.

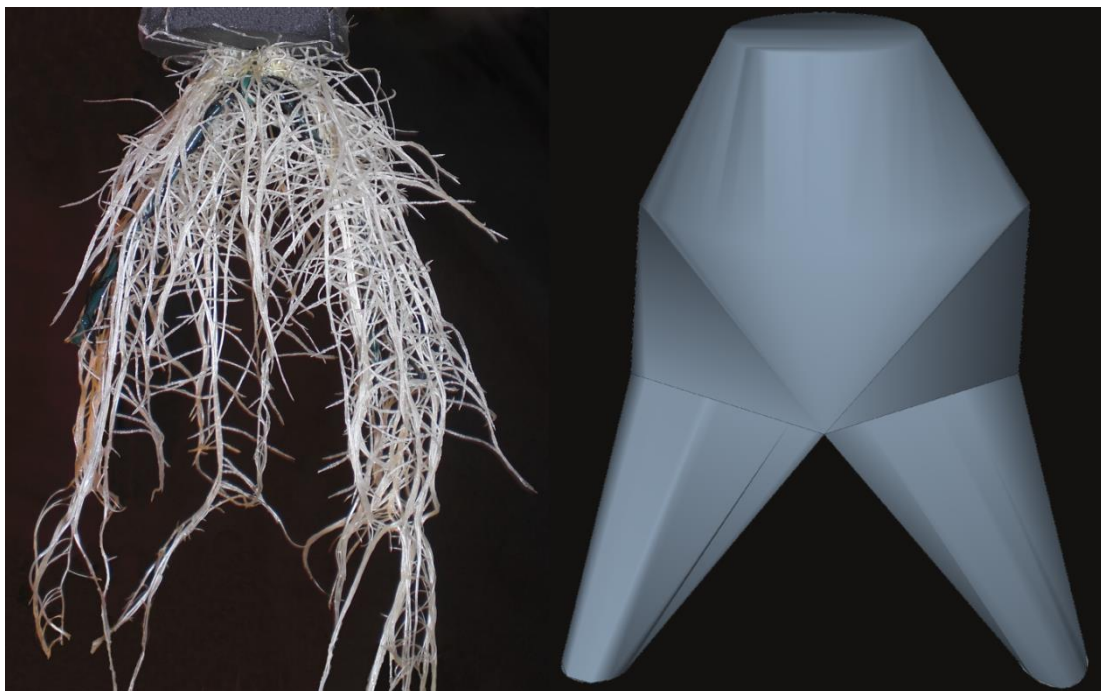


Abbildung 14: Foto 02C30 (links); CAD Zeichnung 02C30 (rechts)

Alle Ergebnisse der genannten Messmethoden sind der Anhangs-CD zu entnehmen. Die Zusammenfassung dieser Urdaten und die Auswertung erfolgt im nächsten Kapitel.

4 Ergebnisse und Diskussion

Kapitel 4 fasst alle ermittelten Messwerte zusammen. Zudem erfolgte eine Darstellung der gemessenen Werte bezogen auf die einzelnen Varianten. Die Werte der Varianten wurden immer mit der Kontrolle verglichen, um Unterschiede oder Gemeinsamkeiten herauszufiltern. Mit Hilfe statistischer Tests wurden Zusammenhänge geprüft. Alle Ergebnisse wurden dargestellt und diskutiert. Der Abschnitt 4.3 Spezielle Auswertungen beschäftigt sich mit der Untersuchung einzelner Sachverhalte, die für die Beantwortung der Versuchsfragen relevant waren.

Die Grundlage der Ergebnisse bildeten alle Pflanzen, die in Tabelle 2 zusammengefasst wurden. Es ergab sich eine Gesamtpflanzenanzahl von 155 Einzelpflanzen in allen vier Teilversuchen. Die verwendeten Urdaten wurden von den Ausfällen bereinigt, um Ausreißer zu vermeiden.

Tabelle 2: Pflanzenanzahl in den einzelnen Versuchen und Varianten

Versuch	A	B	C	E	F	G	Σ
1	6	7	10	9			32
2	11	11	11		11		44
3	6	10	9			10	35
4	11	11	11			11	44
Σ	34	39	41	9	11	21	155

Die Tabelle 3 zeigt die Durchschnittswerte aller gemessenen Größen der 155 Pflanzen, im Folgenden beziehen sich alle Werte auf den ermittelten Durchschnitt. In den Versuchen 1 und 3 wurde kein Wurzelvolumen ermittelt, da die vorhandenen Wurzeln nicht ausreichten, um eine aussagekräftige Auswertung vorzunehmen. Die Werte der PAR entsprachen Abbildung 2. Die vollständige Liste der EC- und pH-Werte findet sich unter „Anhang EC- und pH-Wert“ (S. 85). Die Kulturdauer entsprach dem Versuchsablauf (vgl. Abbildung 11).

Tabelle 3: Durchschnittswerte der Messergebnisse, FM = Frischmasse; TM = Trockenmasse

Versuch	1	2	3	4
Blattanzahl	9,63	34,48	8,77	14,93
Blattfläche in cm ²	19,21	778,85	30,33	296,92
Wurzellänge in cm	42,30	1990,83	87,74	980,00
Wurzelverzweigung	35,25	663,61	61,11	333,61
Wurzelvolumen in cm ³		272,86		97,47
FM Blatt in g	0,6314	29,8298	1,0951	7,9395
FM Wurzel in g	0,0807	4,5166	0,2114	1,7914
TM Blatt in g	0,0693	1,4093	0,0559	0,4917
TM Wurzel in g	0,0110	0,2232	0,0126	0,0997
PAR in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	271,09	273,32	272,86	273,32
pH-Wert	5,65	5,80	5,64	5,75
EC-Wert	1,22	1,62	1,01	1,37
Kulturdauer in d	36	45	31	35
Temp. Außen in °C	13,04	17,08	19,78	21,39
Temp. Innen in °C	20,10	21,84	21,84	22,03
CO ₂ in ppm	451,77	442,87	437,21	443,51
rel. Luftfeuchte in %	71,84	70,60	74,57	79,00

Die Teilversuche können kaum miteinander verglichen werden, da sie unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt wurden (vgl. 4.4.1 Fehler bei der Versuchsdurchführung).

Die Beleuchtung variierte leicht bei den Versuchen, die unterschiedlichen Werte ergaben sich durch den Ausfall einiger Pflanzen, welche nicht mit einbezogen wurden. Die geringe Kulturdauer in Versuch 3 führte dazu, dass EC- und pH-Werte geringer waren. Der EC-Wert in Versuch 2 stellt den gemessenen Wert dar, auf Grund des defekten Messgerätes kann der Wert von der Realität abweichen (vgl. in Kapitel 4.4: EC- und pH-Wert).

Die Innentemperatur war im Versuch 1 geringer als bei den anderen Varianten, diese Werte haben ihren Ursprung in der Klimasteuerung der Kabine. Da Versuch 1

im System ausgesät wurde, wurde zu Beginn die Temperatur verringert, um die Keimung zu optimieren.

Der gemessene CO₂-Gehalt wurde den allgemeinen Klimadaten entnommen, hierbei ist ein leichter Aufwärtstrend festzustellen.

Unabhängig von den Varianten ergaben sich in den Versuchen 2 und 4 folgende Werte:

Im Vergleich der Werte FM Blatt vs. TM Blatt ergab sich ein Durchschnitt aller Pflanzen von ca. 5% Trockenmasseanteil. Die Verteilung der Gesamt TM ergab 14,77% Wurzel und 85,23% Blatt im Durchschnitt aller Varianten. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten.

4.1. Einzelauswertung der Varianten

Um den Erfolg der einzelnen Varianten zu ermitteln sollen die folgenden Tabellen genutzt werden. Es werden jeweils die erreichten Werte dargestellt und mit der Kontrolle (Variante A) verglichen (Prozentwert). Die Kontrolle wird mit den erzielten Durchschnittswerten der Versuche aus Tabelle 3 verglichen.

Für die bessere Lesbarkeit der Tabelle wurde der Vergleichswert der Variante mit der Kontrolle farblich abgesetzt. Eine prozentuale Steigerung wird mit grün hinterlegt, wohingegen eine Verringerung mit rot dargestellt wird. Sehr stark abweichende Werte aus den Versuchen 1 und 3 werden nicht farblich dargestellt, da diese Werte zeigen, welche unter suboptimalen Bedingungen erzielt wurden (bedingt durch Kulturführung).

Der Unterpunkt „Tray“ zeigt die Verteilung der Pflanzen auf die einzelnen Trays⁸. Die genaue Verteilung innerhalb der Trays ist unter „Positionen“ zu finden – die Felder stehen hierbei für die einzelnen Pflanzlöcher.

⁸ Die Nummer des Trays ist „fett“ gedruckt.

Kontrolle

Tabelle 4: Messergebnisse Variante A und Vergleich mit den Durchschnittswerten aus Tabelle 3 in %

Variante A (Kontrolle) Messwert	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Blattfläche in cm ²	16,86 -12,24%	778,42 -0,06%	30,40 0,25%	294,62 -0,78%
Blattanzahl	9,50 -1,30%	34,91 1,25%	8,50 -3,09%	15,18 1,67%
Gesamt TM in g	0,03 -57,62%	1,64 0,24%	0,07 1,70%	0,60 1,42%
Wurzelvolumen in cm ³		173,04 -36,58%		70,18 -28,00%
Wurzellänge in cm	24,86 -41,23%	1996,81 0,30%	111,82 27,44%	953,51 -2,70%
Wurzelverzweigung	27,50 -21,99%	687,36 3,58%	84,83 38,81%	302,91 -9,20%
PAR in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	287,50 5,19%	284,73 4,17%	284,00 3,91%	284,73 4,17%
Ausfälle	5		5	
Positionen	2	0	0	
	1	3	1	
	0	1	2	
	1		0	
Tray	1 2	2 3	3 3	4 3

Die Kontrolle bzw. Variante A zeigte überdurchschnittliche Werte in der Gesamt TM. Im Vergleich des Wurzelvolumens und der Blattfläche lag sie in drei von vier Versuchen unter dem Durchschnitt. Die Variante A verfügte über die höchste PAR im Vergleich zu den anderen Varianten. Das zeigte sich beispielsweise am Versuch 2

– Pflanzen der Kontrolle verfügten im Durchschnitt über 7,3% mehr PAR als Variante B. Die Verteilung in den Trays ist mit drei Pflanzen auf Position 5 mittig fokussiert. Trotz der schlechten Ausgangslage (hohe Konkurrenz auf Grund Pflanzdichte) im Versuch 2 bildeten die Pflanzen eine leicht verringerte Blattoberfläche aus, aber erreichten eine überdurchschnittliche Gesamt TM.

In den Versuchen 1 und 3 verzeichnete die Kontrolle die höchsten Ausfallraten (jeweils 5 Pflanzen).

Kegel

Die Variante B erreichte in den Versuchen 1 und 3 bessere Werte als die Kontrolle. Nur bei Wurzellänge und Wurzelverzweigung im Versuch 3 lag die Kontrolle vorn. Mit vier Ausfallpflanzen in Versuch 1 landete Variante B auf Platz zwei der Ausfallrate.

In den Versuchen 2 und 4 erreichten Pflanzen der Variante B höhere Wurzelwerte⁹, besonders das Wurzelvolumen wurde durch die RSS stark erhöht.

Zudem hat sich gezeigt, dass die Wurzeln jeden Kegel angenommen haben.

Im Vergleich Blattfläche, Blattanzahl und Gesamt TM schneidet die Variante B schlechter als die Kontrolle ab. Variante B verfügte über die geringste PAR im Vergleich zum Durchschnitt. Positioniert waren die Pflanzen tendenziell in der oberen rechten Ecke und der untern linken Ecke. Die Aufteilung auf die unterschiedlichen Trays hätte optimiert werden können, da vier Pflanzen in Tray 3 zu finden sind.

⁹ Wurzelwerte meint hierbei: Wurzellänge, Wurzelverzweigung und falls vorhanden Wurzelvolumen.

Tabelle 5: Messergebnisse der Variante B - Kegel und Vergleich zu Variante A in %

Variante B				
(Kegel)				
Messwert				
	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Blattfläche in cm ²	25,59 51,82%	761,34 -2,19%	31,77 4,49%	286,06 -2,90%
Blattanzahl	10,71 12,78%	34,36 -1,56%	9,20 8,24%	14,64 -3,59%
Gesamt TM in g	0,19 462,20%	1,60 -2,41%	0,07 5,32%	0,57 -4,61%
Wurzelvolumen in cm ³		364,70 110,77%		108,06 53,97%
Wurzellänge in cm	47,12 89,55%	2044,12 2,37%	83,63 -25,21%	1015,38 6,49%
Wurzelverzweigung	36,86 34,03%	689,91 0,37%	55,40 -34,70%	352,73 16,45%
PAR in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	257,00 -5,97%	265,36 -2,91%	262,40 -3,99%	265,36 -2,91%
Ausfälle	4		1	
Positionen	0	2	2	
	1		0	
		1		
	0		0	
	2	2		
			1	
Tray	1 3	2 2	3 4	4 2

Dreieck

Tabelle 6: Messergebnisse der Variante C - Dreieck und Vergleich zu Variante A in %

Variante C (Dreieck) Messwert	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Blattfläche in cm ²	20,99 24,50%	811,34 4,23%	28,82 -5,22%	304,06 3,21%
Blattanzahl	9,80 3,16%	34,64 -0,78%	8,56 0,65%	14,82 -2,40%
Gesamt TM in g	0,07 99,84%	1,74 6,57%	0,06 -11,02%	0,60 0,08%
Wurzelvolumen in cm ³		338,75 95,77%		118,12 68,31%
Wurzellänge in cm	32,88 32,29%	1995,59 -0,06%	82,02 -26,65%	953,70 0,02%
Wurzelverzweigung	48,30 75,64%	705,82 2,68%	51,67 -39,10%	323,18 6,69%
PAR in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	268,20 -1,87%	272,36 -0,35%	276,00 0,98%	272,36 -0,35%
Ausfälle	1		2	
Positionen	1	1	2	
	2	0	1	
	0	1	1	
	1		1	
Tray	1 3	2 3	3 2	4 3

Variante C zeigte bei vielen Messwerten eine Steigerung im Vergleich zur Kontrolle, was sich wie folgt darstellen lässt:

Im Versuch 2 erreichten die Pflanzen im Durchschnitt 6,57% mehr Gesamt TM. In den Versuchen 2 und 4 bildeten die Pflanzen weniger Blätter mit einer höheren

Blattfläche. Das Wurzelvolumen wurde deutlich durch die RSS gesteigert. Auch die Wurzelwerte wiesen eine Steigerung auf. Im PAR-Vergleich lagen die Pflanzen knapp unter dem Durchschnitt. Die Positionierung auf den Trays war gleichmäßig, nur zwei Positionen wurden nicht besetzt. Auch die Verteilung auf die einzelnen Trays war ausgewogen.

Für Versuch 4 wurde die RSS modifiziert, um den Wurzeln mehr Platz zu geben. Der Polyesterstoff wurde komplett entfernt, da er bei den vorangegangenen Versuchen keine Wirkung gezeigt hatte. Für die Auswertung wurden beide Varianten (C, D) zusammengefasst als Variante C (Dreieck).

Halbkugel, Pyramide, Quadrat

Die drei Varianten wurden in einer Tabelle zusammengefasst, da sie in unterschiedlichen Teilversuchen verwendet wurden. Diese vierte Variante in den einzelnen Teilversuchen nahm immer die gleiche Position ein. Innerhalb der Trays war die Verteilung etwas ungleichmäßig, da sich vier Pflanzen in Pflanzloch 4 befinden – fünf Pflanzlöcher wurden nicht bestückt.

Halbkugel

Zur Variante E – Halbkugel muss angemerkt werden, dass die Wurzeln die RSS nicht oder wenig angenommen haben. Für einen erneuten Versuch mit dieser Variante wäre eine Neukonzipierung nötig.

Pyramide

Die Variante F – Pyramide hat gezeigt, dass auch eine von der Form her kleinere RSS eine Steigerung des Wurzelvolumens (+24,22%) herbeiführen konnte. Eine Steigerung bei anderen Messwerten war nicht zu beobachten.

Quadrat

Die Variante G – Quadrat führte ebenfalls zu einer Steigerung des Wurzelvolumens bei Versuch 3 um 33,27%. Die Pflanzen erreichten Steigerungen im Bereich Blattfläche, Wurzellänge und Wurzelverzweigung. Im Vergleich Blattanzahl und Gesamt TM lag sie leicht unter den Werten der Kontrolle. Eine weiterführende Idee für diese Variante wäre mehrere solcher Ebenen einzufügen.

Tabelle 7: Messergebnisse der Varianten E - Halbkugel, F - Pyramide, G - Quadrat und Vergleich zu Variante A in %

Variante	E - Halbkugel	F - Pyramide	G - Quadrat	G - Quadrat
Messwert	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Blattfläche in cm ²	13,83 -17,93%	764,31 -1,81%	30,20 -0,67%	302,94 2,82%
Blattanzahl	8,67 -8,77%	34,00 -2,60%	8,70 2,35%	15,09 -0,60%
Gesamt TM in g	0,04 12,98%	1,55 -5,11%	0,07 -1,26%	0,59 -1,07%
Wurzelvolumen in cm ³		214,95 24,22%		93,53 33,27%
Wurzellänge in cm	25,21 1,40%	1926,80 -3,51%	82,56 -26,17%	997,42 4,61%
Wurzelverzweigung	24,67 -10,30%	649,64 -5,49%	61,10 -27,98%	355,64 17,41%
PAR in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	274,33 0,37%	270,82 -0,91%	273,80 0,18%	270,82 -0,91%
Ausfälle	2		1	
Positionen	1	1	0	
	0		2	
		0		
	4		1	
		0		
	0		2	
Tray	1 3	2 3	3 2	4 3

4.2. Statistische Auswertung

Um Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten zwischen den einzelnen Varianten festzustellen sollten die gemessenen Werte mit Hilfe von statistischen Tests analysiert werden. Für die statistische Auswertung wurde IBM SPSS Statistics Version 21® verwendet. Untersucht wurden die Versuche 2 und 4, da die Versuche 1 und 3 keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielen konnten. Die Tests wurden unabhängig voneinander für jeden einzelnen Versuch durchgeführt.

Zuerst wurden die Werte mit Hilfe des Kolmogorow-Smirnow-Tests auf Normalverteilung überprüft (Anhang Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest, S. 88). Bei der Blattfläche im Versuch 2 ergab sich eine asymptotische Signifikanz von 0,062 – tendenziell folgen die Werte nicht der Normalverteilung. Bei den restlichen Werten lag Normalverteilung vor. Die Stichproben sind als unabhängig voneinander zu betrachten. Die Betrachtungen bezogen sich auf mehr als zwei Stichproben, daher wurde die einfaktorielle ANOVA (analysis of variance) verwendet. Die Ergebnisse der ANOVA zeigten (Anhang Einfaktorielle ANOVA, S. 89), dass sich in Versuch 2 das Wurzelvolumen signifikant ($<0,00$) zwischen den Varianten unterschied. Die restlichen Variablen unterschieden sich nicht signifikant voneinander.

Die statistischen Auswertungen ergaben somit keine (ausgenommen Wurzelvolumen) ersichtlichen Differenzen zwischen den Varianten. Im kommenden Abschnitt sollen daher weitere Gesichtspunkte betrachtet werden, um Unterschiede zu ermitteln.

4.3. Spezielle Auswertungen

Der Abschnitt 4.3 soll verschiedene Sachverhalte untersuchen. Zunächst wird die Ausfallrate in den Versuchen 1 und 3 untersucht, um Gründe für den Ausfall zu finden. Dann soll der Einfluss auf die Pflanzen durch die Faktoren Licht, Pflanzendichte und die Verteilung auf die Trays analysiert werden.

Da die statistischen Tests keine Unterschiede zwischen den Varianten feststellen konnten, soll in den Abschnitten 4.3.5 und 4.3.6 der Einfluss der RSS auf die Pflanzen genauer untersucht werden.

4.3.1. Ausfallrate

Über alle Versuche ergab sich eine Ausfallrate von 11,9% (21 Pflanzen). Die Ausfälle betrafen nur die Versuche 1 und 3. Im Versuch 1 betrug die Ausfallrate 27,3% (12 Pflanzen) und im Versuch 3 20,5% (9 Pflanzen).

Tabelle 8: Ausfallrate nach Variante

Versuch	A	B	C	E	G	Σ
1	5	4	1	2		12
3	5	1	2		1	9
Σ	10	5	3	2	1	21

In beiden Versuchen zeigte sich, dass bei der Kontrollgruppe die Ausfallrate bei 45,5% lag. Im Versuch 1 lag ein weiterer Schwerpunkt auf Variante B (Kegel) mit 36,4%. Der Hauptausfallgrund war Vertrocknung. Ein Grund hierfür könnte die PAR gewesen sein.

Unter allen Ausfällen wurde in Variante A PAR von $283,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und bei Variante B $283,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gemessen. Der durchschnittliche Wert bei den Ausfällen betrug $277,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und lag somit 1,5% über dem Gesamtdurchschnitt von $273,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

4.3.2. Der Einfluss des Lichts auf die Gesamt TM

Als nächstes soll der Einfluss des Lichtes auf das Pflanzenwachstum untersucht werden. Die einzelnen Pflanzlöcher wiesen unterschiedliche PAR-Werte auf (vgl. Abbildung 2). In welchem Umfang sich dieser Unterschied auf die Gesamt TM auswirkte soll in diesem Abschnitt dargestellt werden.

Zunächst wurde statistisch untersucht, ob die PAR mit der Gesamt TM korreliert. Für die Auswertung wurde die Pearson-Korrelation verwendet, der Test ergab folgende Werte: Rangkorrelationskoeffizient (r), Irrtumswahrscheinlichkeit (α) und die Anzahl der Pflanzen (N).

Tabelle 9: Korrelation zwischen PAR und Gesamt TM nach PEARSON

			Versuch 2	Versuch 4
Pearson	PAR	r	0,509	0,588
		α	0	0
		N	44	44

Bei Versuch 2 und 4 ergab sich ein $\alpha < 0,001$. Der durchschnittliche Rangkorrelationskoeffizient betrug 0,51 (Versuch 2) und 0,59 (Versuch 4). Es ist also von einer mittleren bis hohen Korrelation zu sprechen (COHEN 1988). Es ist festzuhalten, dass PAR und Gesamt TM miteinander korrelierten.

Die Auswirkungen dieser Korrelation soll am Beispiel Versuch 4 in Abbildung 15 dargestellt werden.

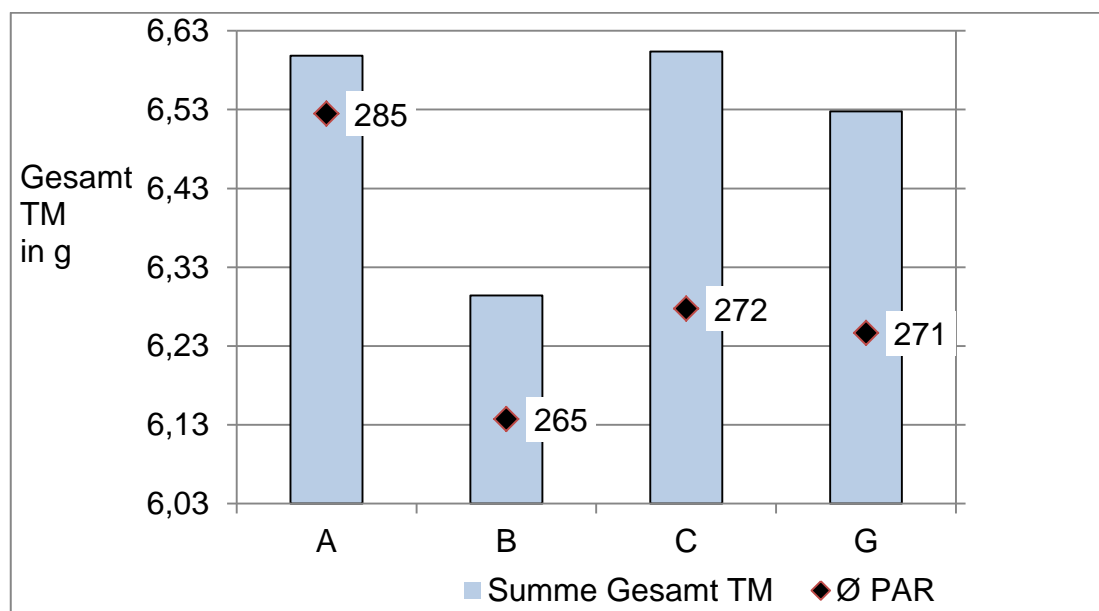


Abbildung 15: Gesamtsumme der Gesamt TM in g der Varianten Versuch 4; Anzahl (N) = 11 Pflanzen pro Variante

Für die Auswertung wurden die einzelnen Gesamt TM der Pflanzen aufsummiert und auf die jeweiligen Varianten verteilt. Innerhalb der Balken ist die durchschnittliche PAR dieser Pflanzen dargestellt.

Die Variante A verfügte über 4,2% mehr PAR als der Durchschnitt und hatte in diesem Sinne bessere Ausgangsbedingungen als die restlichen Varianten. Sie

erreichte eine Summe des Gesamt TM von 6,5983 g. Den höchsten Wert stellte Variante C (6,6038 g) und lag somit leicht über dem Wert der Variante A.

Im Vergleich der Varianten C und G, zeigt Variante G $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ weniger PAR als Variante C und erreicht bei der Gesamt TM einen um 0,0762 g niedrigeren Wert.

Die Variante B verfügt über den niedrigsten PAR-Wert ($265 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) und die niedrigste Gesamt TM (6,2949 g).

Durchschnittlich betrachtet ergab sich für diesen Versuch, dass $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR 2,158 mg Trockenmasse erzeugte. PAR beeinflusste somit direkt das Versuchsergebnis.

4.3.3. Einfluss der Pflanzendichte (Am Beispiel Tray 2 Versuch 2)

Der Versuch 2 stand mit einer Kulturdauer von 45 Tagen am längsten im System. Der Grund dafür war, dass sich die Aussaat von Versuch 3 verzögerte. Daraufhin fiel die Entscheidung, Versuch 2 länger im System zu lassen, um eine ausgedehntere Betrachtung der Wurzeln und RSS durchzuführen. Durch den geringen Pflanzabstand kam es zu Überlappungen der Blätter und zum Konkurrenzkampf um den abiotischen Faktor Licht im Versuch 2.

Die Abbildung 16 zeigt Tray 2 des zweiten Versuchs. Die Werte stehen für die durchschnittlichen Trockenmassen (Gesamt TM in g) der Pflanzen. Die einzelnen Zellen stellen die Pflanzlöcher dar. Für die Veranschaulichung wurden die niedrigen Werte rot, die mittleren Wert gelb und die hohen Werte rot markiert.

1,85		1,57
	1,58	
1,93		1,06
	1,2	
2,16		1,32
	1,17	
1,27		0,76

Abbildung 16: Tray 2 Versuch 2 Gesamt TM der einzelnen Pflanzen in g

Pflanzen im oberen linken Bereich hatten sich gut entwickelt. Von der oberen linken Ecke war ein Gefälle zur unteren rechten Ecke zu erkennen. Die Pflanzen hatten am Ende des Versuches (auf Grund ihrer Größe) um Licht konkurriert. Die Pflanzen, die sich durchsetzen konnten waren gut entwickelt. Die Nachbarpflanzen hingegen wurden in ihrer Entwicklung gehemmt. Betrachtet man den gesamten Versuch 2, dann waren Pflanzen auf den innenliegenden Positionen (2, 5, 8 = Ø 1,52 g) tendenziell leichter als Pflanzen im linken (1, 4, 7, 10 = Ø 1,60 g) und rechten (3, 6, 9, 11 = Ø 1,75 g) Außenbereich.

4.3.4. Unterschiede zwischen den Trays

Der Einfluss des Mikroklimas innerhalb der Gewächshauskabine ist nicht zu vernachlässigen. Daher sollte geprüft werden, ob sich die Trockenmassen der Pflanzen voneinander unterscheiden, abhängig von ihrer Verteilung in der Kabine. Die Betrachtung wurde beispielhaft an den Versuchen 2 und 4 durchgeführt (vgl. Abbildung 17).

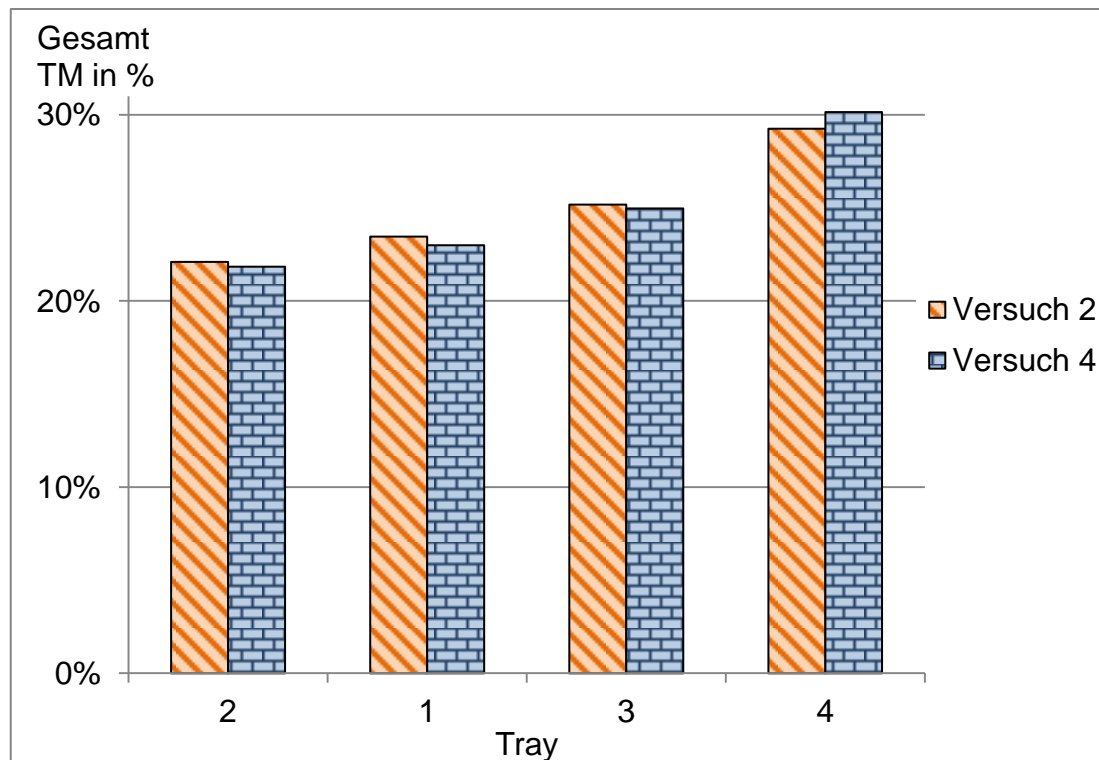


Abbildung 17: Verteilung der Gesamt TM (in %) auf die einzelnen Trays in den Versuchen 2 und 4

Die Trockenmassen der einzelnen Pflanzen aus den Versuchen wurden aufsummiert. Dieser Wert entspricht der Gesamtsumme (100%) eines Versuches. Dann wurden die Trockenmassen der Pflanzen der einzelnen Trays aufsummiert und zur Gesamtsumme ins Verhältnis gesetzt. Es ergab sich somit die Verteilung der Trockenmasse auf die einzelnen Trays.

Diese Verteilung wurde in Abbildung 17 dargestellt. Hierbei zeigte sich ein deutliches Gefälle von Tray 2 über Tray 1 und Tray 3 nach Tray 4. Betrachtet man alle Versuche, dann erreichten die Pflanzen im Tray 2 22,6 g und im Tray 4 30 g Gesamt TM. Dies ergab eine Steigerung von 24,7% der Gesamt TM durch unterschiedliche Standorte innerhalb der Kabine.

Die Gründe für diese Gefälle konnten nicht ermittelt werden. Hierzu wären weitere Messungen des Mikroklimas (z.B. Temperatur pro Pflanze) nötig. Für nachfolgende Versuche sollten die Pflanzen komplett isoliert werden, um diese Einflüsse zu minimieren.

Die in den Abschnitten 4.3.2, 4.3.3 und 4.3.4 dargestellten Einflüsse zeigten deutlich, dass der Versuch von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst wurde. Letztendlich können somit die jeweiligen Erfolge einer Variante nicht ausschließlich auf die Variante selbst bezogen werden.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten sollen im folgenden Abschnitt genauer betrachtet werden.

4.3.5. Vergleich Gesamt TM in den Versuchen 2 und 4

Die statistische Auswertung konnte keine Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten ermitteln. Um trotzdem Unterschiede zu finden, sollen die Ergebnisse grafisch ausgewertet werden.

Die Auswertung soll zunächst mit Hilfe eines Boxplotdiagrammes erfolgen. Das Boxplot beschreibt TUCKEY (1977) wie folgt:

Ein Boxplot soll einen Eindruck darüber vermitteln, in welchem Bereich die Daten lagen und wie sie sich über diesen Bereich verteilten. Die Box, das zentrale Rechteck, verläuft vom oberen (75%) Quartil zum unteren (25%) Quartil, das mittlere (50%) Quartil, welches auch als Median bekannt ist, wird als Strich in die Box eingezeichnet.

Die Antennen (Whisker) zeigen maximal das 1,5fache des Interquartilabstandes, wenn sich dort ein Datenwert befindet. Der Interquartilabstand steht für die Ausdehnung der Box. Die Spannweite beschreibt den gesamten Wertebereich des Datensatzes (inklusive Ausreißer). Ausreißer werden als „o“ dargestellt und zeigen Datenwerte, welche außerhalb des 1,5fachen Interquartilabstandes (maximale Whiskerausdehnung) liegen.

In Versuch 2 (

Abbildung 18) wurden die Gesamt TM in g der Varianten Kontrolle (A), Kegel (B), Dreieck (C) und Pyramide (F) betrachtet.

Das obere Quartil der Variante Dreieck (C) lag über den oberen Quartilen von B und F. Variante C wies den höchsten Median auf. Die Variante C verfügte über die höchste Spannweite.

Variante Kegel (B) schaffte Maximalwerte bis zu 2,3 g, allerdings konzentrierte sich der Hauptteil (81,8%) im mittleren Bereich.

Die Variante Pyramide (F) verfügte über den niedrigsten Median. Eine Pflanze der Variante erreichte den niedrigste Wert (0,72 g).

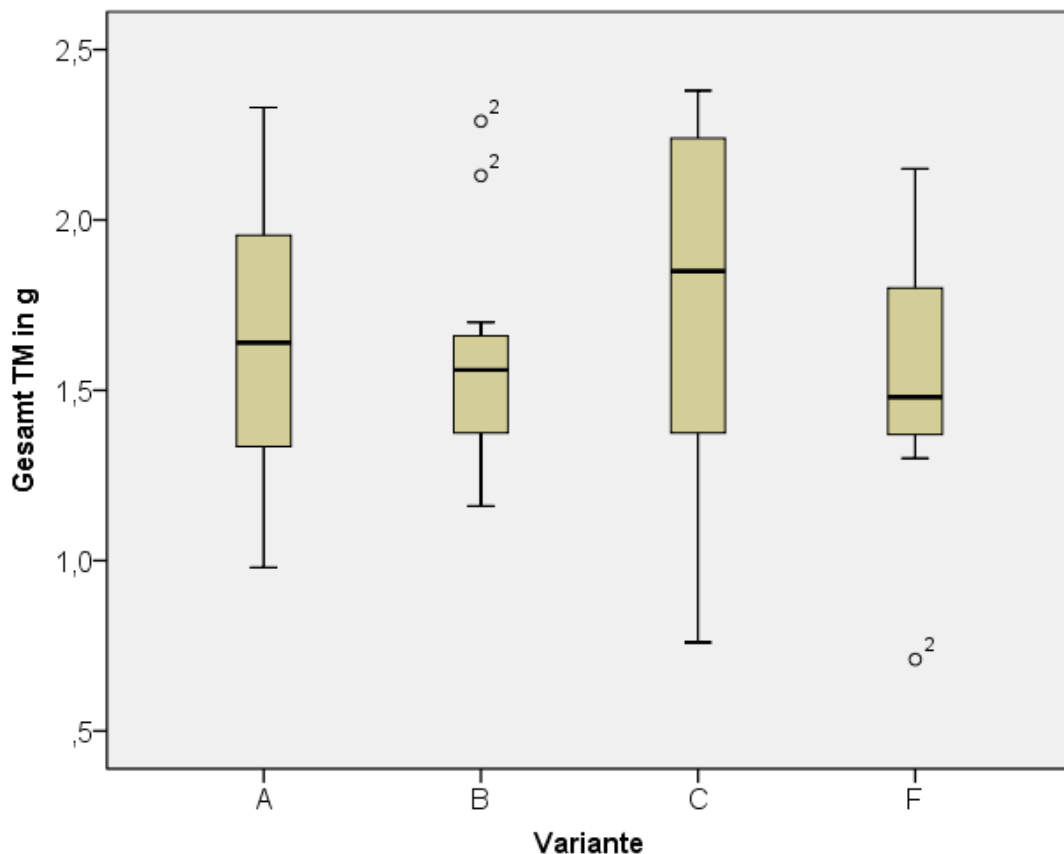


Abbildung 18: Boxplot Gesamt TM (in g) der Varianten A, B, C und F in Versuch 2

In Versuch 4 (

Abbildung 19) wurden die Varianten Kontrolle (A), Kegel (B), Dreieck (C) und Quadrat (G) betrachtet.

Variante A und G verfügten über die höchsten Mediane. Die Variante A stellte mit einem Wert von ca. 1 g den höchsten Wert des Versuches.

Variante B zeigte Werte im Mittelfeld, die Spannweite war innerhalb der Spannweiten von C und G. Variante C verfügte über den niedrigsten Median. Der

ober Whisker zeigte die längste Ausdehnung im Vergleich zu den restlichen Varianten.

Trotz besseren Ausgangsbedingungen (z.B. PAR), zeigte die Variante A die höchste Spannweite.

Die Variante G zeigte ähnliche Werte wie B und C.

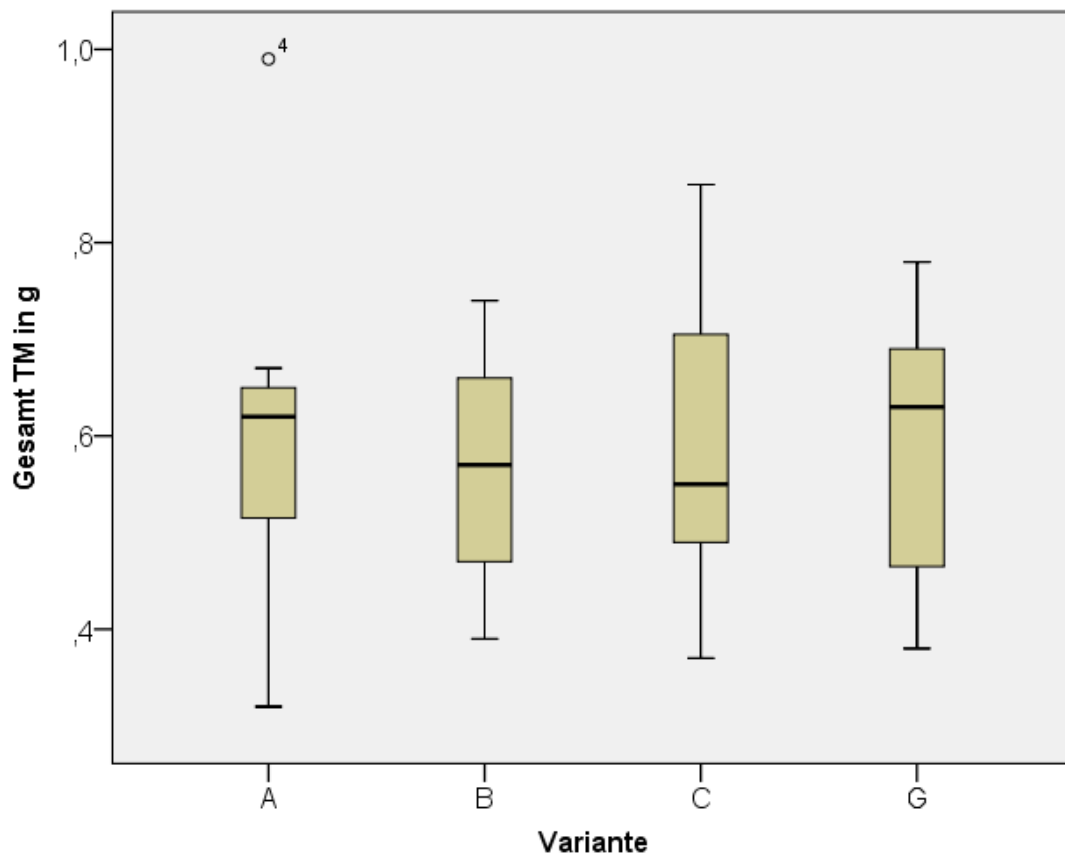


Abbildung 19: Boxplot Gesamt TM (in g) der Varianten A, B, C und G in Versuch 4

Zwischen den einzelnen Varianten waren keine nennenswerten Unterschiede festzustellen.

Die

Abbildung 20 und

Abbildung 21 zeigt die Gesamt TM in g in den Versuchen 2 und 4. Verglichen wurden hierbei die Variante A mit den restlichen Varianten (B, C, F, G).

Der Median der Variante A (Abbildung 20) lag etwas über dem Median der restlichen Varianten. Zudem verfügte die Variante A über eine geringere Spannweite.

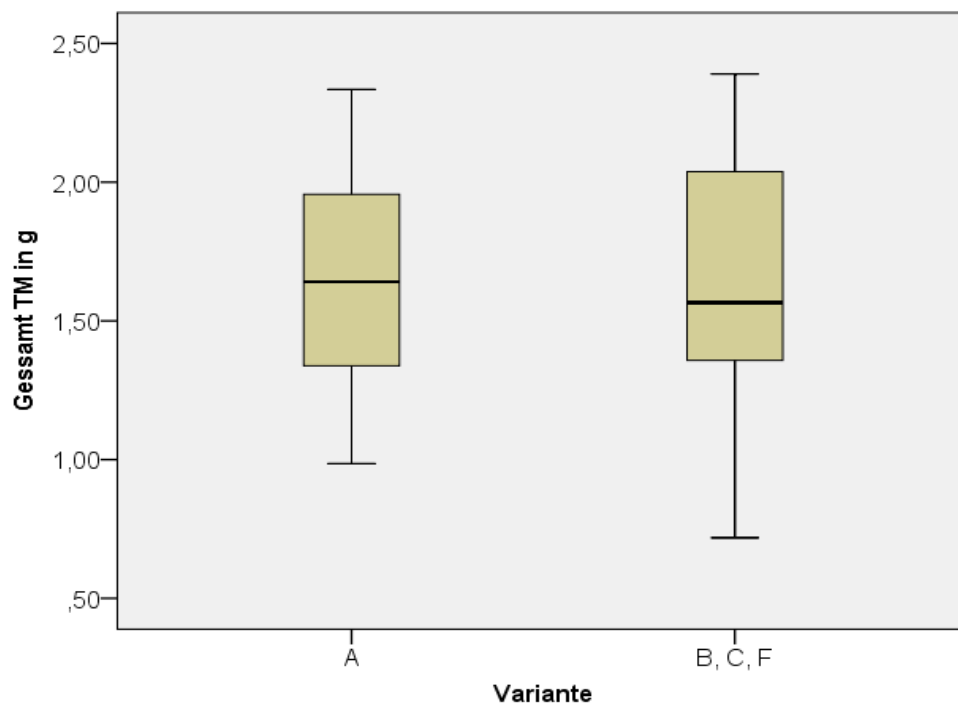


Abbildung 20: Vergleich der Gesamt TM (in g) zwischen A und B, C, F in Versuch 2

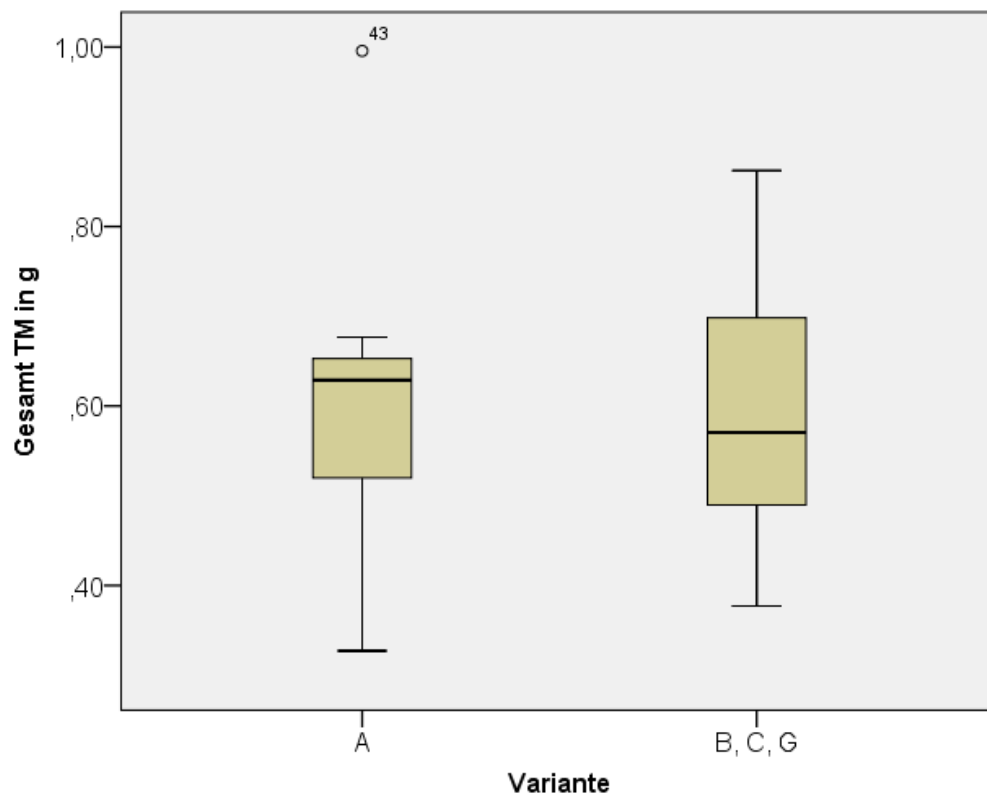


Abbildung 21: Boxplot Gesamt TM (in g) zwischen A und B, C, G in Versuch 4

Im Versuch 4 (Abbildung 21) lag Median der Variante A über dem der Varianten B, C, G. Zudem stellte die Variante A den besten Wert von ca. 1 g (Gesamt TM). Die Variante A zeigte die größere Spannweite.

Zwischen den Varianten B, C, F und G ließ sich kein wesentlicher Unterschied zur Variante A feststellen.

4.3.6. Einfluss der RSS auf die Pflanzen am Beispiel Versuch 4

Im vorherigen Abschnitt zeigte sich, dass die RSS sich kaum von der Kontrolle unterschieden. In diesem Abschnitt soll überprüft werden, ob die Erhöhung des Wurzelvolumens einen positiven Einfluss auf die Pflanzen hatte.

Die Masse eines Körpers ist das Produkt aus seinem Volumen und seiner Dichte. Unter normalen Bedingungen, d.h. ohne RSS, verhalten sich Wurzelvolumen und Gesamt TM proportional zueinander (JAMMER. 1997).

Dieser Sachverhalt sollte in Abbildung 22 untersucht werden. Im Diagramm wurden alle Pflanzen des vierten Versuches mit ihrem Wurzelvolumen (in cm^3) und ihrer Gesamt TM (in g) eingezeichnet.

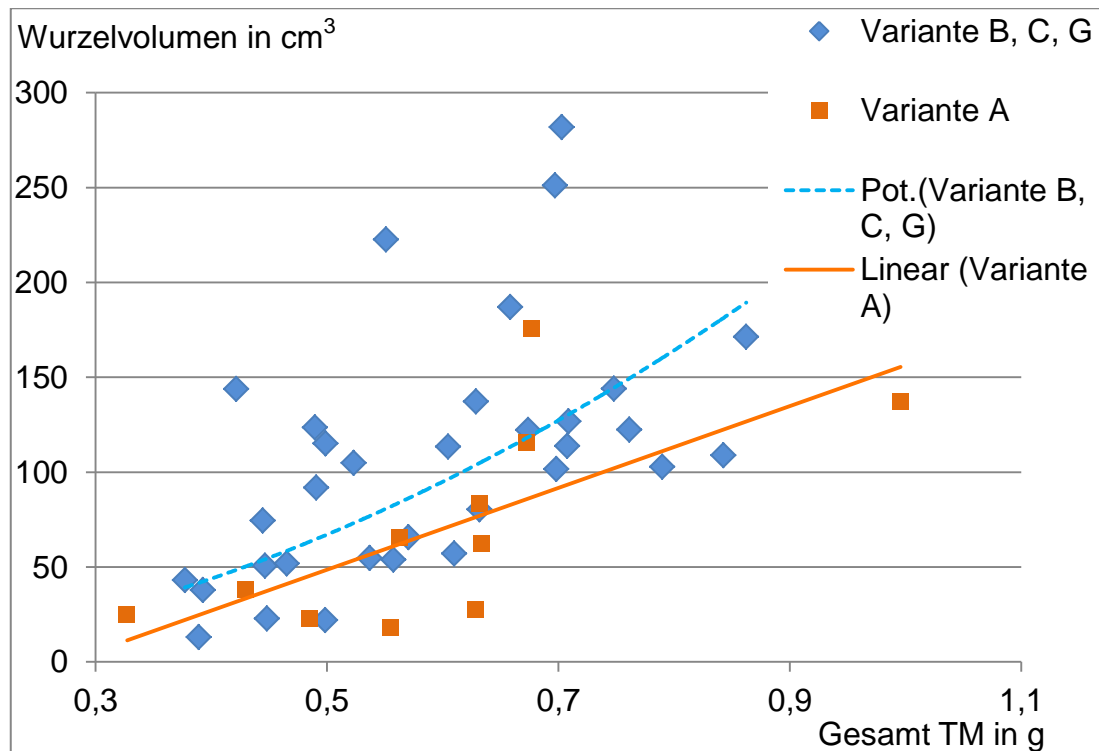


Abbildung 22: Wurzelvolumen in cm^3 und Gesamt TM in g der Pflanzen in Versuch 4

Den Punkten wurde eine Trendlinie zugeordnet. Für die Variante A ergab sich eine lineare Trendlinie mit einem Bestimmtheitsmaß¹⁰ von 0,49. Somit bestätigte sich der Zusammenhang zwischen Gesamt TM und Wurzelvolumen. Einer Erhöhung des Volumens um 1 cm^3 stand eine Erhöhung der Masse um 0,002 g gegenüber (vgl. Anhang Regression Volumen/Masse S. 92). Die Korrelation von Masse und Volumen betrug 0,697 (vgl. Anhang Regression Volumen/Masse S. 92), somit ist von einer hohen Korrelation zu sprechen (COHEN 1988).

Die Varianten B, C und G wurden durch eine potenzielle Trendlinie beschrieben und wiesen ein $r^2 = 0,40$ auf. Einer Erhöhung des Volumens um 1 cm^3 stand eine Erhöhung der Masse um 0,001 g gegenüber (vgl. Anhang Regression Volumen/Masse S. 92). Die Korrelation von Masse und Volumen betrug 0,537 (vgl. Anhang Regression Volumen/Masse S. 92), somit ist von einer hohen Korrelation zu sprechen (COHEN 1988).

Die Erhöhung des Wurzelvolumens durch die RSS erzeugte somit keine nachweisbar höhere Gesamt TM.

¹⁰ Das Bestimmtheitsmaß (r^2) gibt an, wie viel Prozent der Varianz, d.h. die Streuung der einen Variable durch die Streuung der anderen Variable erklärt werden können (KUTNER et al. 2005).

Die RSS erhöhten das Wurzelvolumen, gleichzeitig wurde so die Wurzelichte¹¹ verringert. Der Einfluss der Wurzelichte auf die Blatttrockenmasse wurde in Abbildung 23 dargestellt.

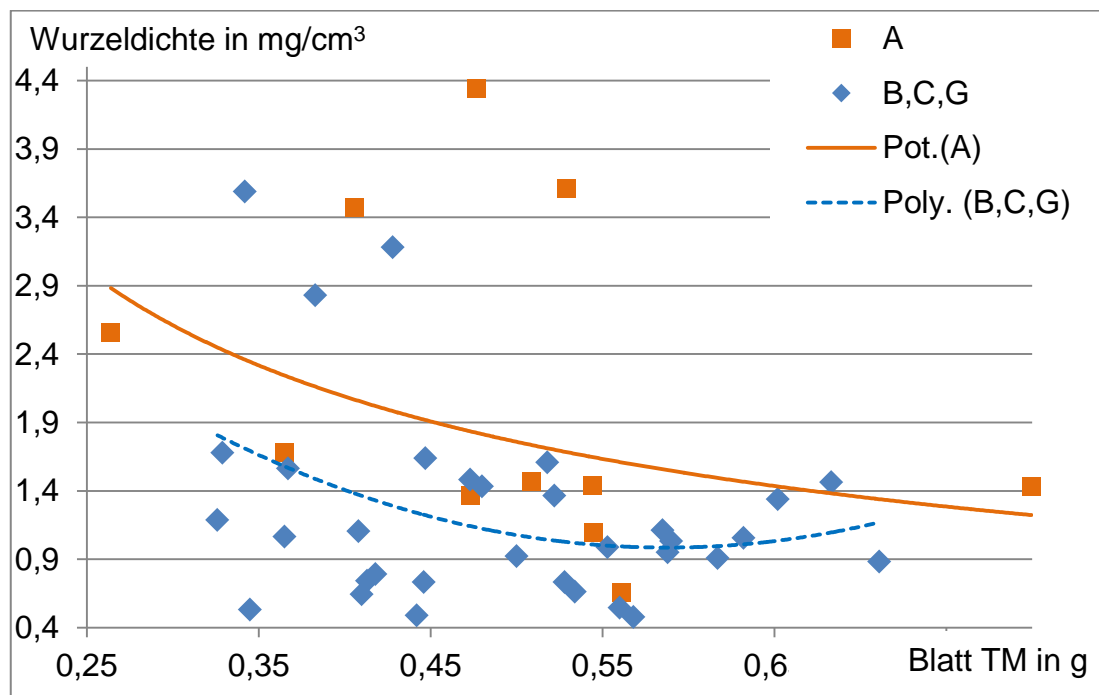


Abbildung 23: Wurzelichte und Blatt TM der Pflanzen in Versuch 4

Die Abbildung 23 zeigt deutlich, dass Pflanzen mit einer niedrigen Wurzelichte eine höhere Blatttrockenmasse ausbildeten. Die Varianten B, C und G zeigten Werte mit geringer Wurzelichte und höher Blatttrockenmasse. Der Höchstwert (0,8 g) wurde von der Variante A erreicht, aber wies auch eine geringe Wurzelichte auf. Hier zeigte sich, dass die RSS über ein Potential verfügen, welches näher untersucht werden kann.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigten, dass im durchgeführten Versuch die RSS keine deutliche Steigerung der Gesamt TM der Pflanzen bewirkten.

Die Erhöhung des Wurzelvolumens durch die RSS führte gleichzeitig zur Verringerung der Wurzelichte. Im Vergleich der Wurzelichte zur Blatttrockenmasse zeigte sich, dass eine geringere Wurzelichte eine Steigerung der Blatttrockenmasse bewirkte.

¹¹ Die Wurzelichte ρ (Rho) ist der Quotient aus der Wurzelmasse und dem Wurzelvolumen (Nič et al. 2009).

Für weitere Aussagen zur Wirkung der RSS müssen zusätzliche Untersuchungen ausgeführt werden. Der Abschnitt 4.4 Fehlerbetrachtung soll auf Fehler innerhalb des durchgeführten Versuches hinweisen, sodass diese Sachverhalte in kommenden Versuchen unterbunden werden können.

4.4. Fehlerbetrachtung

Der Abschnitt 4.4 soll die Durchführung des Versuches und Ermittlung der Messwerte auf Fehler überprüfen. Die Feststellung dieser Fehler soll erfolgen, um eine Wiederholung bei nachfolgenden Versuchen zu verhindern. Zudem soll verdeutlicht werden, dass die Messwerte und in Folge dessen die Ergebnisse gewissen Abweichungen unterliegen.

4.4.1. Fehler bei der Versuchsdurchführung

Versuch 1

Im Versuch 1 erfolgte die Aussaat im System. Hierbei waren Temperatur und Feuchtigkeit nicht optimal. Die optimale Keimtemperatur für Salat liegt bei 16 °C – die Temperatur in der Kabine schwankte zwischen 18 und 21 °C. Die Werte wichen aber noch nicht so stark ab, dass keine Keimung mehr möglich wäre. Wesentlich eingeschränkt wurde die Keimung durch die Feuchtigkeit. Das Aerosol reichte nicht aus, um das Saatgut feucht zu halten. Hier sollte man eine ähnliche Methode wie AeroFarms™ verwenden. Zudem war das Saatgut aus dem Jahr 2011 und daher nicht mehr voll keimfähig. Dies führte dazu, dass nur sehr wenige Pflanzen aufgingen und sich von ihrer Entwicklung stark voneinander unterschieden.

Versuch 2

Während Versuch 2 stellte sich heraus, dass das verwendete EC-Wert-Messgerät falsche Werte anzeigte.

Im späteren Versuchszeitraum kam das System an seine Grenzen. Die Pflanzen erreichten Größen bei denen sie sich gegenseitig überdeckten und um Licht konkurrierten. Hier hätte eher geerntet werden können, um Verzerrungen zu

verhindern. Die Entscheidung fiel die Pflanzen im System zu lassen, um genauer zu beobachten inwiefern die Wurzeln mit den RSS kooperierten. Zudem ergab sich eine zeitliche Lücke, da der nächste Satz Schwierigkeiten bei der Keimung hatte.

Versuch 3

Vor Beginn des 3. Versuches stieg die Außentemperatur stark an (vgl. Klimadaten Anhangs-CD). Die Entscheidung fiel daraufhin auf zwei Aussaatmethoden. Ein Teil wurde in einer Gewächshauskabine bei Außentemperatur ausgesät (\varnothing 22 °C). Der andere Teil wurde in der Kühlkammer (8 °C) ausgesät. Beide Varianten zeigten keinen gleichmäßigen Aufgang. Für den Versuch wurden 44 etwa gleich große Pflanzen entnommen und in das System überführt. Weiterhin kam hinzu, dass der EC-Wert nicht so optimal wie bei Versuch 2 eingestellt werden konnte, da die Vergleichswerte nicht übereinstimmten (auf Grund des fehlerhaften Messgerätes). Daher wurde der EC-Wert relativ niedrig angesetzt (0,8). Es wurden keine Mangelerscheinungen festgestellt, aber die verringerte Nährstoffmenge könnte eine Ursache für das verlangsamte Wachstum sein.

Versuch 4

Während des vierten Versuches traten keine ersichtlichen Fehler auf.

EC- und pH-Wert

Am 04.06.2014 zeigte sich eine Abweichung der gemessenen Werte zwischen dem bisher verwendeten EC-Messgerät und dem als Kontrolle verwendeten. Da eine Kontrolle vorher nicht möglich war, da nur ein Messgerät zu Verfügung stand, konnte nicht genau bestimmt werden wie lange die Abweichung den Versuch beeinflusste. Das neue Messgerät (Leitfähigkeits- und TDS-Handmessgerät Hanna HI 99301) zeigte einen um 0,37 höheren Wert an, da es vor wenigen Tagen geeicht worden war, wurde dieser Wert als richtig angenommen.

Generell lässt sich sagen, dass die vorgenommenen EC- und pH-Werteinstellungen bei Versuch 2 gut abgestimmt waren. Durch die Abweichung bei der Messung ergab sich eine gewisse Unsicherheit bei der Einstellung der Konzentration, welche sich bei den geringeren Werten in Versuch 3 widerspiegelte. Im Versuch 4 wurden die gewonnenen Erfahrungen genutzt und ein sehr gutes, gleichmäßiges Ergebnis erzielt. Während der gesamten Versuche wurden bei keiner Pflanze Nährstoffmangel oder -überschusssymptome festgestellt.

Umsetzung

Trotz des vorsichtigen Umsetzens der Pflanzen nach der Keimung wurden die Pflanzen beschädigt. Hauptsächlich die Feinwurzeln blieben in der Erde. Dies beeinflusste direkt das Wachstum der Pflanzen, da diese in ihrer Entwicklung zurück geworfen wurden. Dieser Schritt beeinträchtigt weniger das Versuchsergebnis, da alle Pflanzen umgesetzt wurden (RAVEN et al. 2013).

Bedingungen innerhalb der Kabine

Die Lichtkarte (Abbildung 2) zeigte deutlich, dass eine exakte Verteilung des Lichts nicht möglich war. Dies beeinflusste direkt die Ergebnisse (Tabelle 9).

Es wurden keine Messungen der Luftzirkulation oder der Temperatur pro Pflanze vorgenommen. Aber es ist davon auszugehen, dass die Klimaanlage einen Einfluss auf die Pflanzen hatte. Innerhalb der Versuche ergaben sich starke Differenzen im Vergleich der Gesamt TM zwischen den Trays (Abbildung 17).

Eine wichtige Komponente, die in der Kammer fehlte, war die Möglichkeit der CO₂-Begasung. Eine Steigerung des CO₂-Gehaltes von 350 auf 1000 ppm erhöht das Gewicht bei Kopf- und Eissalat um mehr als 30% und verkürzt die Kulturzeit um 8 bis 10 Tage (ANDREAS 1989, VAN HOFF 1991, MOL 1991). Durch die Verkürzung der Kulturzeit wäre ein weiterer Teilversuch möglich gewesen. Zudem könnte eine CO₂-Begasung ähnliche Bedingungen wie in anderen Versuchen aus der Literatur schaffen, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

4.4.2. Fehler bei der Ermittlung der Messwerte

Wurzelgewicht

Bei der Ernte wurden die Wurzeln beschädigt und einige Bestandteile ließen sich zudem nicht von der RSS lösen und waren im Neoprenring verwachsen.

Die Trennung von Wurzel und Spross erfolgte innerhalb der Markierung (siehe Abbildung 12). Hierbei konnte es zu Verschiebungen kommen (zugunsten der Wurzel- oder Blattmasse), je nach dem wo der Schnitt angesetzt wurde.

Die Wurzel wurde direkt aus dem System entnommen, fotografiert und gewogen. Dadurch hatten sie nicht die Möglichkeit richtig abzutrocknen. Abhängig vom Zeitpunkt der letzten Besprühung mit Nährlösung, haftete an den Wurzeln

unterschiedlich viel Restnährlösung. Diese Restmenge beeinflusste die Frischmasse der Wurzeln. Auf Grund dessen wurde die Wurzelfrischmasse weniger in die Auswertung einbezogen.

Wurzelvolumen, Wurzellänge, Wurzelverzweigung

Ein ausgewachsenes Wurzelsystem kann kaum präzise genug vermessen werden. DITTMER (1937) stellte fest, dass eine einzelne Roggenpflanze aus 13.815.672 Ästen besteht und eine Länge von 622 km, eine Oberfläche von 237 km² und Wurzelhaare von einer Länge von 11.000 km besitzt.

Bei der Messung der genannten Werte trat eine gewisse Fehlerquote auf, da die Ausgangswerte für die Berechnungen geschätzt wurden. Schwierigkeiten taten sich zudem auf, da oft nasse Wurzeln zusammenhingen und somit schwer differenzierbar voneinander waren.

Die Wurzelvolumenmessung wurde bei den Versuchen 1 und 3 nicht durchgeführt, da zu wenige Wurzeln vorhanden waren.

Stand die Kamera nicht genau senkrecht zum Objekt, konnte es zu Verzerrungen und Fehlern in der Bildauswertung kommen. Dieser Fehler betraf alle Messungen bei denen Fotografien die Berechnungsgrundlage bildeten.

Blattfläche

Für die Vermessung der Blattfläche wäre es optimaler gewesen, wenn die Verwendung einer geeigneten Software möglich gewesen wäre. Zudem hätte das Einrollen der Blätter durch die Fixierung mit einer Glasscheibe verhindern können (HEMPEL 2014).

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen zu Wurzelstützstrukturen in aeroponischen Systemen am Beispiel von *Lactuca sativa*. Die theoretischen Grundlagen der Aeroponik und die, für den durchgeführten Versuch, wichtigen Aspekte wurden zu Beginn eingeführt.

Der durchgeführte Versuch wurde detailliert erfasst und dargestellt. Zudem wurden die verwendeten Messmethoden aufgelistet und beschrieben.

Zusammenfassend für die Versuchsdurchführung lässt sich sagen, dass die Versuchsbedingungen nicht optimal waren. Die unterschiedliche PAR (Abbildung 2) und das Gefälle zwischen den Trays (Abbildung 17) zeigten dies deutlich. Eine Optimierung durch beispielsweise die Beleuchtung per LED Panel wäre denkbar, um eine gleichmäßige PAR zu gewährleisten.

Untersuchungen zeigten, dass Pflanzen in Perlit als PSS am besten wachsen im Vergleich zu den Varianten mit *Sphagnum* und ohne festem Medium (HAYDEN et al. 2004). Eventuell sollte daher die PSS überarbeitet werden.

Die Ergebnisse zeigten, dass RSS die Wurzeldichte verringern. Pflanzen mit geringeren Wurzeldichten wiesen in Versuch 4 höhere Blatttrockenmassen auf. Zwischen den einzelnen Varianten konnten keine deutlichen Unterschiede festgestellt werden.

Für weitere Aussagen zur Wirkung der RSS müssen zusätzliche Untersuchungen ausgeführt werden. Im Rahmen der Arbeit zeigte sich, welche folgenden Punkte bei erneuter Versuchsdurchführung berücksichtigt werden sollten:

- Anzahl der Versuchspflanzen: Für die bessere Differenzierung der einzelnen Varianten wird eine höhere Anzahl Pflanzen benötigt.
- Abiotischer Faktoren: Die externen Einflüsse auf die Pflanzen (z.B. Mikroklima) müssen auf ein Minimum reduziert werden, sodass nur die Wirkung der Varianten auf das Pflanzenwachstums gemessen wird.
- Messmethoden: Für exakte Ergebnisse müssen die Messmethoden präziser gestaltet werden. Hierbei sollte auf Methoden wie beispielsweise die μ CT oder automatische Bildverarbeitung zurückgegriffen werden.

Sollte durchaus eine Verbesserung des Pflanzenwachstums durch RSS nachgewiesen werden, müssten zudem Fragen des Materials und der Verarbeitung der RSS geklärt werden. Die im Versuch für die RSS verwendeten Materialien eigneten sich nur teilweise, waren dafür aber leicht zu handhaben und für einen Erstversuch ausreichend.

Gleichzeitig muss auch die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der RSS geprüft werden, damit der Nutzen die Kosten überwiegt.

6 Literaturverzeichnis

- AeroFarms™ Systems LLC (2014a): The AeroFarms™ System. Ed Harwood. Online verfügbar unter <http://aerofarms.com/why/technology/>, zuletzt geprüft am 11.10.2014.
- AeroFarms™ (2014b): The AeroFarms™ System. Online verfügbar unter: <http://aerofarms.com/wordpress/wp-content/themes/aerofarms/images/why/smarter/technical-diagram.jpg>. Zuletzt geprüft am: 11.10.2014.
- Al-Ghazi, Y.; Muller, B.; Pinloche, S.; Tranbarger, T. J.; Nacry, P.; Rossignol, M. (2003): Temporal responses of Arabidopsis root architecture to phosphate starvation: evidence for the involvement of auxin signalling. In: *Plant Cell Environ* 26 (7), S. 1053–1066.
- Andreas, C. (1989): Neue Salate unter Glas mit und ohne CO₂ - Düngung. In: *Gemüse*, 1989 (25, 2), S. 52–54.
- Arnold, D.L; Hoagland, D.R (1940): Crop production in artificial culture solutions and in soils with special references to factors influencing yields and absorption of inorganic nutrients. In: *Soil Sci.* (50), S. 463–484.
- Bailey, P.H.J; Currey, J.D; Fitter, A.H (2002): The role of root system architecture and root hairs in promoting anchorage against uprooting forces in *Allium cepa* and root mutants of *Arabidopsis thaliana*. In: *J. Exp. Bot.* (53), S. 333–340.
- Balch, O. (2013): Hi-tech farming: growing plants in urban warehouses. In: *theguardian* 2013, 03.04.2013. Online verfügbar unter <http://www.theguardian.com/sustainable-business/tech-farming-plants-urban-warehouses>, zuletzt geprüft am 27.09.2014.
- Barak, P.; Smith, J.D; Krueger A.R.; Peterson, L.A (1996): Measurement of short-term nutrient uptake rates in cranberry by aeroponics. In: *Plant, Cell and Environment* 1996, 1996 (19), S. 237–242.
- Barber, S.A (1995): Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. New York: Wiley-Interscience.
- Barker, B.T.P (1922): Studies on root development. In: *Long Ashton Res. Station Ann. Rep.* 1921, S. 9–57.
- Barta, D.J; Henninger, D.L (1994): Regenerative life support systems--why do we need them? In: *Advanced in space research: the official journal of the Committee of Space Research (COSPAR)* 1994, 1994 (14(11)), S. 403–410.
- Benaroya, Haym (2010): Lunar settlements. Boca Raton: CRC Press (Advances in engineering).
- Biddinger, E.J; Liu C.M.; Joly R.J.; Raghothama K.G.: Physiological and molecular responses of aeroponically grown tomato plants to phosphorous deficiency. In: *J. AM Soc. Hortic. Sci.* (123), S. 330–333.
- Bidel, L. (2000): MassFlowDyn I: A Carbon Transport and Partitioning Model for Root System Architecture. In: *Annals of Botany* 85 (6), S. 869–886.

- Bigler Samen AG (2014): Gemüse-Saatgut 2014/15. Hg. v. Bigler Samen AG. Thun, zuletzt geprüft am 11.10.2014.
- Blackwell, P. S.; Wells, E. A. (1983): Limiting oxygen flux densities for oat root extension. In: *Plant Soil* 73 (1), S. 129–139.
- Bloom, A.J; Jackson, L.E; Smart, D.R (1993): Root growth as a functional of amonium and nitrate in the root zone. In: *Plant Cell Environ.* 1993, 1993 (16), S. 199–206.
- Böhm, Wolfgang (1979): *Methods of Studying Root Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Ecological Studies, Analysis and Synthesis, 33).
- Böhme, M.; Pinker, I. (2014): Asian leafy vegetables and herbs cultivated in substrate culture and aeroponics in greenhouse. In: *Acta Hort. (ISHS)*, 2014 (1034), S. 155–162. Online verfügbar unter http://www.actahort.org/books/1034/1034_18.htm, zuletzt geprüft am 21.10.2014.
- Bowman, D. C.; Devitt, D. A.; Engelke, M. C.; Rufty, T. W. (1998): Root Archutecture Affects Nitrate Leaching from Bentgrass Turf. In: *Crop Science* 38 (6), S. 1633.
- Brechner, M.; Both, A.J (2013): *Cornell Controlled Environment Agriculture. Hydroponic Lettuce Handbook*. Hg. v. Cornell University. New York.
- Brown, D. (2009): He grows shoots, he scores. Microgreen "farm" ist pleasing chefs, teasing palates. In: *The Denver Post* 2009, 2009 (March 4).
- Buchanan, Bob B.; Gruissem, Wilhelm; Jones, Russell L. (2000): *Biochemistry & molecular biology of plants*. Rockville, Md: American Society of Plant Physiologists.
- Burger, W.D; Soffer, H. (1988): Effects of Dissolved Oxygen Concentrations in Aero-hydroponics on the Formation and Growth of Adventitious Roots. In: *J. AM Soc. Hortic. Sci.*, 1988 (113(2)), S. 218–221. Online verfügbar unter http://www.eurohydro.com/pdf/articles/gb_dissolved_oxygen.pdf, zuletzt geprüft am 11.10.2014.
- Burgess, T.; McComb, J.; Hardy, G. (1998): Influence of low oxygen levels in aeroponics chambers on eucalypt roots infected with *Phytophthora cinnamomi*. In: *Plant Disease*, 1998 (82), S. 368–373.
- Callaham, D.; Newcomb, W.; Torrey, J.G; Peterson, R.L (1979): Root hair infection in actinomycete-induced root nodule initiation in *Casuarina*, *Myrica*, and *Comptonia*. In: *Bot. Gaz.*, 1979 (140 (Supl.)), S. S1-S9.
- Cannel, R.Q (1977): Soil aeration and compaction in relation to root growth and soil management. In: *Applied Biology* (II), S. 1–86. Academic Press, New York.
- Carter, W.A (1942): A method of growing plants in water vapor to facilitate examination of roots. In: *Phytopathology*, 1942 (732), S. 623–625.
- Cheers, G. (Hg.) (2003): *Botanica. Das ABC der Pflanzen ; 10.000 Arten in Text und Bild*. Köln: Könemann.
- Chen, B.; Fu, Z.; Pan, Y.; Wang, J.; Zeng, Z. (2010): Single Leaf Area Measurement Using Digital Camera Image. In: *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*, Bd. 345, S. 525–530.

- Chen, X.; Dhungel, J.; Bhattarai, S. P.; Torabi, M.; Pendergast, L.; Midmore, D. J. (2011): Impact of oxygation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species. In: *Journal of Plant Ecology* 4 (4), S. 236–248.
- Chindi, A.; Giorgis, W.G; Atsede, S.; Tessama, L.; Negash, K. (2014): Rapid Multiplication Techniques (RMTs): A Tool for the Production of Quality Seed Potato (*Solanum tuberosum* L.) in Ethiopia. In: *Asian J. of Crop Science* 6 (3), S. 176–185.
- Clark, L.; Whalley, W.; Leigh, R.; Dexter, A.; Barraclough, P. (1999): Evaluation of agar and agarose gels for studying mechanical impedance in rice roots. In: *Plant Soil*, 1999 (207), S. 37–43.
- Clark, R.T; MacCurdy, R.B; Jung, J.K; Shaff, J.E; McCouch, S.R; Aneshansley, D.J; Kochian, L.V (2011): Three-dimensional root phenotyping with a novel imaging and software platform. In: *PLANT PHYSIOLOGY*, 2011 (156), S. 455–465.
- Cohen, Jacob (1988): Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2. Aufl. Hillsdale, N.J: L. Erlbaum Associates.
- Coll, L.; Potvin, C.; Messier, C.; Delagrange, S. (2008): Root architecture and allocation patterns of eight native tropical species with different successional status used in open-grown mixed plantations in Panama. In: *Trees* 22 (4), S. 585–596.
- Collin, M.; Rasmuson A. (1990): Mathematical modeling of water and oxygen transport in layered soil covers for deposits of pyritic mine tailings. In: *Proceedings of the GAC-MAC Annual Meeting, Vancouver, Canada*, 1990, S. 311–333.
- Coston, D.C; Krewer, G.W; Owing, R.C; Denny, E.G (1983): Air Rooting of Peach Semihardwood Cutting. In: *HortScience*, 1983 (18(3)), S. 323.
- Den Herder, G.; van Isterdael, G.; Beeckman, T.; Smet, I. de (2010): The roots of a new green revolution. In: *Trends in Plant Science* 15 (11), S. 600–607. Online verfügbar unter http://ac.els-cdn.com/S1360138510001780/1-s2.0-S1360138510001780-main.pdf?_tid=d3603a4a-5aca-11e4-b599-00000aacb361&acdnat=1414078970_869b5919acf936b9ae9df34e6525da0f, zuletzt geprüft am 23.10.2014.
- Dey, P. M.; Harborne, J. B.; Bonner, J. (1997): Plant biochemistry. San Diego: Academic Press.
- Diggle, A. J. (1988): ROOTMAP—a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems. In: *Plant Soil* 105 (2), S. 169–178.
- Dittmer, H.J (1937): A quantitative study of the roots and root hairs of winter rye plant (*Secale cereale*). In: *Am. J. Bot*, 1937 (24), S. 417–420.
- Doussan, C. (1998): Modelling of the Hydraulic Architecture of Root Systems: An Integrated Approach to Water Absorption—Model Description. In: *Annals of Botany* 81 (2), S. 213–223.
- Dreschel, T.W; Carlson, C.W; Wells, H.W; Anderson, K.F; Knott, W.M; Munsey, W. (1993): Physical Testing for the Microgravity Plant Nutrient Experiment. In: *International Summer Meeting American Society of Agricultural Engineers*, 1993.

- Drew, M.C (1979): Root development and activities. In: *Arid-land Ecosystems: Structure, Functioning and Management*, S. 573-606. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Du Toit, L. J.; Kirby, H. W.; Pedersen, W. L. (1997): Evaluation of an Aeroponics System to Screen Maize Genotypes for Resistance to *Fusarium graminearum* Seedling Blight. In: *Plant Disease* 81 (2), S. 175–179.
- Eckart, Peter (1996): Spaceflight life support and biospherics. Torrance, Calif, Dordrecht, Boston: Microcosm Press; Kluwer Ac (Space technology library, 5).
- Ennos, A.R; Fitter, A.H (1992): Comparative functional morphology of the anchorage systems of annual dicots. In: *Funct Ecol*, 1992 (6), S. 71–78.
- Erickson, R.O (1976): Modeling of plant growth. In: *PLANT PHYSIOLOGY*, 1976 (27), S. 407–434.
- Eshel, A.; Beeckman, T. (2013): Plant roots. The hidden half. 4. Aufl. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Farran, I.; Mingo-Castel A.M. (2006): Potato minituber production using aeroponics: Effects of density and harvest intervals. In: *Am. J. Potato Res.*, 2006 (83(1)), S. 47–53.
- Fitter, A.H; Stickland, T.R (1992): Fractal characterization of root system architecture. In: *Funct. Ecol.*, 1992 (6), S. 632–635.
- Fogel, R. (1985): Roots as primary producer in below-ground ecosystems. In: *Ecological Interactions in Soil: Plants Microbes and Animals*. Unter Mitarbeit von A.H Fitter, D. Atkinson, D.J Read und M.B Usher. special publication No. 4 of the British Ecological Society. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- French, A.; Ubeda-Tomás, S.; Holman, T.J; Bennett, M.J. Pridmore T. (2009): High-throughput quantification of root growth using a novel image-analysis tool. In: *PLANT PHYSIOLOGY*, 2009 (150), S. 1784–1795.
- Galton, F. (1889): Natural inheritance. By Francis Galton. London: Macmillan.
- Gamuyao, R.; Chin, J. H.; Pariasca-Tanaka, J.; Pesaresi, P.; Catausan, S.; Dalid, C. et al. (2012): The protein kinase Pstol1 from traditional rice confers tolerance of phosphorus deficiency. In: *Nature* 488 (7412), S. 535–539.
- Gerland, P.; Raftery, A. E.; ev ikova, H.; Li, N.; Gu, D.; Spoorenberg, T. et al. (2014): World population stabilization unlikely this century. In: *Science*. Online verfügbar unter http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/environment/SID_%202014_%20wallchart.pdf, zuletzt geprüft am 20.09.1014.
- Giacomelli, G.A; Hayden, A.L; Pagliarulo, C.L (2004): Potential for Greenhouse Aeroponik Cultivation of *Urtica dioica*. In: *Acta Hort*. 2004 (659), S. 61–66.
- Gregory, P.J (2006): Plant Roots: Their Growth, Activity, and Interaction with Soils. Oxford: Blackwell Publishing.
- Gregory, P.J; Nortcliff, S. (2013): Soil Conditions and Plant Growth. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.

- Gunning, B.E S.; Steer, M.W (1996): Bildatlas zur Biologie der Pflanzenzelle. Struktur und Funktion. 4. Aufl. Stuttgart, Jena, New York: G. Fischer.
- Halstead, T.W; Scott, T.K (1990): Experiments of plants in space. In: *Fundamentals of space biology*, 1990, S. 9–19.
- Hamilton, W.J; Seely, M.K (1976): Fog basking by the Namib Desert beetle, *Onymacris unguicularis*. In: *Nature* 262 (5566), S. 284–285.
- Hammer, G.L; Dong, Z.; McLean, G.; Doherty, A.; Messina, C.; Schussler, J. et al. (2009): Can Changes in Canopy and/or Root System Architecture Explain Historical Maize Yield Trends in the U.S. Corn Belt? In: *Crop Science* 49 (1), S. 299–312.
- Harper, C. (2014): MIT CityFARM. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge. Online verfügbar unter <http://www.mitcityfarm.com/>, zuletzt geprüft am 27.09.2014.
- Hayden, A.L; Pagliarulo, C.L (2001): Potential for Greenhouse Aeroponic Cultivation of Medicinal Root Crops. Hg. v. Department of Plant Sciences University of Arizona Controlled Environment Agriculture Center. Tucson.
- Hayden, A.L; Brigham, L.A. Giacomelli G.A (2004): Aeroponic Cultivation of Ginger (*Zingiber officinale*) Rhizomes. Hg. v. Native American Botanics Corporation und University of Arizona. Tucson.
- Hayden, A.L (2006): Aeroponic and Hydroponic Systems for Medicinal Herb, Rhizome, and Root Crops. In: *HortScience* 2006, 2006 (Vol. 41(3)), S. 536–538.
- Hegi, G. (1906): Illustrierte Flora Mitteleuropa. Mit besonderer Berücksichtigung von Deutschland, Österreich und Schweiz. München: J.F.Lehman.
- Hellriegel, H. (1883): Beitrag zu den naturw. Grundlagen des Ackerbaus mit besonderer Berücksichtigung der agrikulturchemischen Methode der Sandkultur. Braunschweig: Vieweg & Sohn.
- Helm, J. (1954): *Lactuca Sativa* L. in morphologisch-systematischer Sicht. In: *Kulturpflanze*, 1954 (2), S. 72–129.
- Helphand, Kenneth I. (2006): *Defiant gardens. Making gardens in wartime*. San Antonio, Tex: Trinity University Press.
- Hempel, A.-J (2014): Vermessung Blattfläche. Hanau, 31.10.2014. Telefonat an J. Hempel.
- Heß, D. (1999): Pflanzenphysiologie. Molekulare und biochemische Grundlagen von Stoffwechsel und Entwicklung der Pflanzen ; 15 Tabellen. 10. Aufl. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (UTB für Wissenschaft, 15).
- Hoehn, A. (1998): Root Wetting Experiments aboard NASA's KC-135 Microgravity Simulator. In: *BioServe Space Technologies*, 1998.
- Hubick, K.T; Drakeford, D.R; Reid, D.M (1982): A comparison of two techniques for growing minimally water-stressed plants. In: *Canadian Journal of Botany*, 1982 (60), S. 219–223.
- Jammer, M. (1997): Concepts of mass. In classical and modern physics. Mineola, N.Y: Dover Publications.

- Kang, J.G.; Kim, S.Y.; Om, Y.H.; Kim, J.K. (1996): Growth and tuberization of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars in aeroponic, deep flow technique and nutrient film technique culture films. In: *J. Korean Soc. Hort. Sci.* (37), S. 24–27.
- Karinga, J.; Kipkoech, D.N.; Lung'aho, C.; Mbiyu, M.W.; Ng'ang'a, N.M.; Nyongesa, M.; Pwaipwai, P. (2010): Potato (*Solanum Tuberosum*) Minituber Production using Aeroponics: Another Arrow in the Quiver? Hg. v. Kenya Agricultural Research Institute-Tigoni. Limuru.
- Kawamura-Aoyama, C.; Fujiwara, K.; Shinohara, M.; Takano, M. (2014): Study on the Hydroponic Culture of Lettuce with Microbially Degraded Solid Food Waste as a Nitrate Source. In: *JARQ* 48, 2014 (1), S. 71–76.
- Kim, H.S.; Lee, M.A.; Woo, I.S.; Moon, C.S.; Lee, Y.B.; Kim, S.Y. (1999): Production of high quality potato plantlets by autotrophic culture for aeroponic systems. In: *J. Korean Soc. Hort. Sci.* (123), S. 330–333.
- Körber-Grohne, U. (1987): Nutzpflanzen in Deutschland. Stuttgart: Konrad Theiss Verlag.
- Kratsch, H. A.; Graves, W. R.; Gladon, R. J. (2004): Aeroponic system for control of root-zone atmosphere. In: *Environmental and Experimental Botany* 55 (1-2), S. 70–76, zuletzt geprüft am 22.10.2014.
- Krug, H.; Bender, J. (2002): Gemüseproduktion. Ein Lehr- und Nachschlagewerk für Studium und Praxis ; mit 113 Tabellen. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.
- Kutner, M. H.; Nachtsheim, C. J.; Neter, J.; Li, W. (2005): Applied linear statistical models. 5. Aufl. Boston: McGraw-Hill Irwin (The McGraw-Hill/Irwin series operations and decision sciences).
- Kutschera, L. (2010): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. Unter Mitarbeit von Erwin Lichtenegger. 1960. Aufl. Frankfurt, M: DLG-Verl. (Wurzelatlas-Reihe, 1).
- Kutschera, L.; Lichtenegger, E. (2002): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. Graz [Austria]: Leopold Stocker (Band ... Wurzelatlas-Reihe, 6).
- Kutschera, U. (2002): Prinzipien der Pflanzenphysiologie. 2. Aufl. Heidelberg [u.a.]: Spektrum, Akad. Verl. (Spektrum-Lehrbuch).
- Lambers, H. (2006): Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus: Matching Morphological and Physiological Traits. In: *Annals of Botany* 98 (4), S. 693–713.
- Leitner, D.; Schnepf, A. (2009): Root Growth Simulation using L-Systems. In: *Proceedings of Algoritmy*, 2009, S. 313–320.
- Liao, H.; Ge, Z.; Yan, X. (2001): Ideal root architecture for phosphorus acquisition of plants under water and phosphorus coupled stresses: From simulation to application. In: *Chin.Sci.Bull.* 46 (16), S. 1346–1351.
- Luxmoore, R. J.; Stolzy, L. H.; Letey, J. (1970): Oxygen Diffusion in the Soil-Plant System IV. Oxygen Concentration Profiles, Respiration Rates, and Radial Oxygen Losses Predicted for Rice Roots¹. In: *Agronomy Journal* 62 (3), S. 329.

- Lynch, J. (1995): Root Architecture and Plant Productivity. In: *PLANT PHYSIOLOGY* (109), S. 7–13. Online verfügbar unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC157559/pdf/1090007.pdf>, zuletzt geprüft am 22.10.2014.
- Lynch, J. P. (2007): TURNER REVIEW No. 14. Roots of the Second Green Revolution. In: *Aust. J. Bot.* 55 (5), S. 493.
- Lynch, J. P.; Brown, K. M. (2012): New roots for agriculture: exploiting the root phenome. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 367 (1595), S. 1598–1604.
- Lynch, J.; Nielsen, K.L (1996): Simulation of root system architecture. In: *Plant Roots: The Hidden Half*, S. 247–258. Marcel Dekker Inc., New York.
- Lynch, J.; van Beem, J. (1993): Growth and architecture of seedling roots of common bean genotypes. In: *Crop Sci*, 1993 (33), S. 1253–1257.
- Mairhofer, S.; Zappala, S.; Tracy, S. R.; Sturrock, C.; Bennett, M.; Mooney, S. J.; Pridmore, T. (2012): RooTrak: Automated Recovery of Three-Dimensional Plant Root Architecture in Soil from X-Ray Microcomputed Tomography Images Using Visual Tracking. In: *PLANT PHYSIOLOGY* 158 (2), S. 561–569, zuletzt geprüft am 22.10.2014.
- Mancuso, S. (2012): Measuring roots. An updated approach. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Martin-Laurent, F.; Lee, S.-K; Tham, F.-Y; He, J.; Deim, H.G (1997): Anewapproach to enhance growth and nodulation of *Acacia mangium* through aeroponic culture. In: *Biol. Fertility Soils*, 1997 (25), S. 7–12.
- Mateus-Rodriguez, J.R; Haan, S.de; Andrade-Piedra, J.L; Maldonado, L.; Hareau, G.; Barker, I. et al. (2013): Technical and Economic Analysis of Aeroponics and other Systems for Potato Mini-Tuber Production in Latin America. In: *Am. J. Potato Res.* 90 (4), S. 357–368, zuletzt geprüft am 25.10.2014.
- Mbiyu, M.W; Muthoni, J.; Kabira, J.; Elmar, G.; Muchira, C.; Pwaipwai, P. et al. (2013): Use of aeroponics technique for potato (*Solanum tuberosum*) minitubers production in Kenya. In: *International Journal of Horticulture and Floriculture* (Vol. 1 (3)), S. 16–20.
- Miller, Frederic P. (2009): Aeroponics. Hg. v. Agnes F. Vandome und John McBrewster. Beau Bassin, Mauritius: Alphascript Pub.
- MoA/GTZ: Ministry of Agriculture / Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (2009): National Potato taskforce report. Final report. Hg. v. Ministry of Agriculture and Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. Nairobi.
- Mohr, H.D (1978): Die Durchwurzelung von Böden in Abhängigkeit von wichtigen Bodeneigenschaften. In: *Kali-Briefe* 14 (2), S. 103–113.
- Mol, C. (1991): Kwalitei zware sla bezorgt telers hoofbrekens. In: *Groenten en Fruit / Glasgroenten*, 1991 (8), S. 22–23.
- Morard, P.; Lacoste, L.; Silvestre, J. (2000): Effect of oxygen deficiency on uptake of water and mineral nutrients by tomato plants in soilless culture. In: *Journal of Plant Nutrition* 23 (8), S. 1063–1078.

- Müller, H. (1875): Über Wachstum und Bedeutung der Wurzeln. In: *Landw. Jahrb.* (4), S. 999–1033.
- NASA (2006): NASA Spinoff. Progressive Plant Growing Has Business Blooming. In: *Environmental and Agricultural Resources NASA Spinoff 2006* 2006, 2006, S. 68–72. Online verfügbar unter http://spinoff.nasa.gov/Spinoff2006/er_2.html, zuletzt geprüft am 20.09.2014.
- Neumann, G.; Bott, S.; Ohler, M. A.; Mock, H.-P.; Lippmann, R.; Grosch, R.; Smalla, K. (2014): Root exudation and root development of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Tizian) as affected by different soils. In: *Front. Microbiol.* 5, zuletzt geprüft am 25.10.2014.
- Nič, M.; Jirát, J.; Košata, B.; Jenkins, A.; McNaught, A. (Hg.) (2009): IUPAC Compendium of Chemical Terminology. Research Triangle Park, NC: IUPAC.
- Nichol, W.W (2007): Nutritional Disorders of Ruminants Caused by Consumption of Pasture and Fodder Crops. In: *Pasture and Supplements of Grazing Animals*, S. 133–149.
- Nicholson, R.V; Gillham R.W.; Cherry J.A.; Reardon E.J. (1989): Reduction of acidgeneration in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layersas oxygen barriers. In: *Can. Geotech. J.*, 1989 (26), S. 1–8.
- Nir, I. (1982): Growing plants in aeroponics growth system. In: *Acta Hort.*, 1982 (126), S. 435–448.
- Orman-Ligeza, B.; Parizot, B.; Gantet, P. P.; Beeckman, T.; Bennett, M. J.; Draye, X. (2013): Post-embryonic root organogenesis in cereals: branching out from model plants. In: *Trends in Plant Science* 18 (8), S. 459–467.
- Otaú, V. (2010): Manual on quality seed potato production using aeroponics, 2010. Online verfügbar unter <http://cipotato.org/wp-content/uploads/2014/08/005447.pdf>, zuletzt geprüft am 11.10.2014.
- Pagès, L.; Vercambre, G.; Drouet, J.-L; Lecompte, F.; Collet, C.; Le Bot, J. (2004): Root Typ: a generic model to depict and analyse the root system architecture. In: *Plant and Soil* 258 (1), S. 103–119.
- Peterson, L.A; Krueger, A.R (1988): An intermittent aeroponics system. In: *Crop Sci*, 1988 (28), S. 712–713.
- Prusinkiewicz, P.; Lindenmayer, A. (1990): The Algorithmic Beauty of Plants. New York, NY: Springer New York (The Virtual Laboratory).
- Raven, P.H; Evert, R.F; Eichhorn, S.E (2013): Biology of plants. Eighth edition. New York: W.H. Freeman and Company Publishers.
- Rich, S. M.; Watt, M. (2013): Soil conditions and cereal root system architecture: review and considerations for linking Darwin and Weaver. In: *Journal of Experimental Botany* 64 (5), S. 1193–1208.
- Rijk Zwaan (2011): Sortiment 2011/2012. Welver.

- Ritter, E.; Angulo, B.; Riga, P.; Herran, C.; Relloso, J.; San, J.M (2001): Comparison of hydroponics and aeroponics cultivation systems for the production of potato minitubers. In: *Potato Research* (44), S. 127–135.
- Schnelle-Kreis, J.; Sklorz, M.; Herrmann, H.; Zimmermann, R. (2007): Atmosphärische Aerosole: Quellen, Vorkommen, Zusammensetzung. In: *Chem. Unserer Zeit* 41 (3), S. 220–230.
- Schopfer, P.; Brennicke, A.; Mohr, H. (2006): Pflanzenphysiologie. 6. Aufl. München: Elsevier, Spektrum Akad. Verl.
- Sessa, J. (2014): Facts about future growings's aeropoinc Tower Garden® Technology. Hg. v. Future Growing® LLC. Apopka, Florida. Online verfügbar unter <http://www.organicsofchicago.org/index.html>, zuletzt geprüft am 21.10.2014.
- Shibusawa, S. (1992): Hierarchical modeling of a branching growth root system based on L-system. In: *Acta Hort. (ISHS)*, 1992 (319), S. 659–664. Online verfügbar unter http://www.actahort.org/books/319/319_106.htm.
- Silk, W.K (1992): Steady form from changing cells. In: *Int. J. Plant Sci.*, 1992 (153), S. S49-S58.
- Sinan, E. (2014): Mixponics. Hg. v. Hydroser. Izmir. Online verfügbar unter <http://hydroser.com/services/mixponics>, zuletzt geprüft am 11.10.2014.
- Sinha, Rajiv K. (2004): Modern plant physiology. Pangbourne: Alpha Science.
- Skaggs, T.H; Shouse P.J. (2008): Roots and root function: introduction. In: *Vadose Zone J* (7), S. 1008–1009.
- Soffer, H.; Burger, D. W.; Lieth, J.H (1991): Plant growth and development of Chrysanthemum and Ficus in aero-hydroponics: response to low dissolved oxygen concentrations. In: *Scientia Horticulturae* 45 (3-4), S. 287–294.
- Steven, W.; Running, C.; Patrick, R. (1980): temperature influences on root resistance of Pinus contorta seedlings. In: *PLANT PHYSIOLOGY* (65), S. 635–640.
- Stoner, R.J (1983a): Aeroponics Versus Bed and Hydroponic Propagation. In: *Florists' Review*, 1983a (Vol. 173 No 4477).
- Stoner, R.J (1983b): Rooting in Air. In: *Greenhouse Grower*, 1983b (Vol 1 No 11).
- Stoner, R.J; Clawson J.M. (1998): A High Performance, Gravity Insensitive, Enclosed Aeroponic System for Food Production in Space. In: *NASA SBIR NAS10-98030*, 1998.
- Stoner, R.J; Clawson J.M. (2000): Low-mass, Inflatable Aeroponic System for High Performance Food Production., 2000 (NASA SBIR NAS10-00017).
- Tittel, C.(1986): Compositae. In: Rudolf Manfelds Verzeichnis landw. u. gärtnerischer Kulturpflanzen, Bd. 3, S. 1261–1335.
- Tracy, S. R.; Roberts, J. A.; Black, C. R.; McNeill, A.; Davidson, R.; Mooney, S. J. (2010): The X-factor: visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography. In: *Journal of Experimental Botany* 61 (2), S. 311–313.

- Tuhus-Dubrow, R. (2014): No Sun, No Soil, No Problem: Eat an Indoor Farm Salad. In: *Nextcity* 2014, 20.05.2014. Online verfügbar unter <http://nextcity.org/daily/entry/city-farm-aeroponics-mit-indoor-farm>, zuletzt geprüft am 27.09.2014.
- Tukey, J.W (1977): Exploratory data analysis. Reading, Mass: Addison-Wesley Pub. Co. (Addison-Wesley series in behavioral science).
- van der Weele, C. M.; Jiang, H.S; Palaniappan, K.K; Ivanov, V.B (2003): A New Algorithm for Computational Image Analysis of Deformable Motion at High Spatial and Temporal Resolution Applied to Root Growth. Roughly Uniform Elongation in the Meristem and Also, after an Abrupt Acceleration, in the Elongation Zone. In: *PLANT PHYSIOLOGY* 132 (3), S. 1138–1148, zuletzt geprüft am 22.10.2014.
- van Dongen, J.T (2012): Oxygen in plants – how an elixir could cause stress and act as a signal in parallel. Hg. v. Max-Planck-Institut für molekulare. Potsdam-Golm.
- van Hoff, P. (1991): Klimaat stuurt ontwikkeling gewas. In: *Groenten en Fruit / Glasgroenten* 1991, 1991 (21), S. 34–35.
- van Noordwijk, M.; Spek, L.Y; Willigen, P. de (1994): Proximal root diameters as predictors of total root system size for fractal branching models. In: *I. Theory Plant Soil*, 1994 (164), S. 107–118.
- van Noordwijk, M.; Willigen, P. de (1984): Mathematical models on diffusion of oxygen to and within plant roots, with special emphasis on effects of soil-root contact. In: *Plant Soil* 77 (2-3), S. 233–241.
- Vaughan, M.M; Tholl, D.; Tokuhisa, J.G (2011): An aeroponic culture system for the study of root herbivory on *Arabidopsis thaliana*. In: *Plant Methods* 7, 2011 (1).
- Weathers, P.J; Zobel, R.W (1992): Aeroponics for the culture of organisms, tissues and cells. In: *Biotechnol. Adv.*, 1992 (10), S. 93–115.
- Weaver, A.G (2008): Big-time Farmer of Tiny Crop. In: *The Growing Edge* 2008, 2008 (November/December), S. 26–28.
- Went, F.W (1957): The experiment control of plant growth. New York: Ronald Press.
- Wonneberger, C. (2004): Gemüsebau. 117 Tabellen. Stuttgart: Ulmer.
- World Health Organization (2003): Traditional Medicine: Fact Sheet. N°134. Genf (Traditional Medicine Programme).
- Yanful, E.K (1993): Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. In: *J. Geotech. Eng.*, 1993 (ASCE 119), S. 1207–1228.
- Zander, R.; Erhardt, W. (2008): Zander. Handwörterbuch der Pflanzennamen : [20000 Arten, 10000 Synonyme, aktualisierte Nomenklatur]. 18. Aufl. Stuttgart: Ulmer.
- Zasytkin, D. V.; Lee T.-C. (1999): Food Processing on a Space Station: Feasibility and Opportunities. In: *Life Support & Biosphere Science* 1999, 1999 (Vol. 6), S. 39–52.
- Zhang, W.P; Guo Y.; Li B.G (2006): Development and application of three-dimensional growth model of root system in wheat seedling. In: *Scientia Agricultura Sinica*, 2006 (39(11)), S. 2261–2269.

- Zobel, R.W (1989): Steady-state control and investigation of root system morphology. Unter Mitarbeit von J.G.Winship L.J Torrey. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp. 165-182.
- Zobel, R.W; Del Tredici P.; Torrey J.G (1975): Method for growing plants aeroponically. In: *PLANT PHYSIOLOGY*, 1975 (57), S. 344–346.

7 Anhang

6.1. Anhang EC- und pH-Wert	85
6.2. Anhang Versuchsanordnung.....	87
6.3. Anhang Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest	88
6.4. Anhang Einfaktorielle ANOVA	89
6.5. Anhang Regression Volumen/Masse.....	92

7.1. Anhang EC- und pH-Wert

Datum	pH	EC	Datum	pH	EC
Versuch 1			20.05.14	5,65	1,18
08.04.14	5,50	1,00	21.05.14	5,70	1,18
09.04.14	5,95	1,00	22.05.14	5,65	1,39
10.04.14	5,50	1,00	23.05.14	5,66	1,39
11.04.14	5,57	1,00	24.05.14	5,66	1,39
12.04.14	5,57	1,08	25.05.14	5,66	1,40
13.04.14	5,50	1,09	26.05.14	5,66	1,41
14.04.14	5,42	1,11	27.05.14	5,70	1,41
15.04.14	5,50	1,14	28.05.14	5,70	1,65
16.04.14	5,75	1,12	29.05.14	5,70	1,65
17.04.14	6,00	1,10	30.05.14	5,70	1,65
18.04.14	5,58	1,08	31.05.14	5,70	1,65
19.04.14	5,46	1,10	01.06.14	5,70	1,65
20.04.14	5,53	1,09	02.06.14	5,79	1,80
21.04.14	5,49	1,04	03.06.14	5,80	1,80
22.04.14	5,55	1,13	04.06.14	5,81	1,79
23.04.14	5,80	1,10	05.06.14	5,85	1,80
24.04.14	5,60	1,09	06.06.14	5,84	1,91
25.04.14	5,48	1,09	07.06.14	6,00	1,91
26.04.14	5,83	1,09	08.06.14	5,82	1,96
27.04.14	5,52	1,09	09.06.14	5,95	1,96
28.04.14	5,90	1,10	10.06.14	5,76	2,00
29.04.14	5,53	1,11	11.06.14	5,96	2,00
30.04.14	5,75	1,10	12.06.14	5,78	1,99
01.05.14	5,47	1,08	13.06.14	6,10	1,99
02.05.14	5,45	1,07	14.06.14	6,40	1,99
03.05.14	5,75	1,07	15.06.14	6,70	1,99
04.05.14	5,60	1,08	16.06.14	5,79	2,21
05.05.14	5,93	1,10	Versuch 3		
06.05.14	5,40	1,11	16.06.14	5,50	0,81
07.05.14	5,80	1,75	17.06.14	5,50	0,79
08.05.14	5,82	1,84	18.06.14	5,45	0,80
09.05.14	5,78	1,84	19.06.14	5,60	0,80
10.05.14	5,80	1,83	20.06.14	5,75	0,80
11.05.14	5,85	1,82	21.06.14	5,44	0,81
12.05.14	5,80	1,81	22.06.14	5,50	0,80
13.05.14	5,83	1,82	23.06.14	5,52	1,00
Versuch 2			24.06.14	5,60	1,00
14.05.14	5,48	1,18	25.06.14	5,70	1,00
15.05.14	5,56	1,17	26.06.14	5,47	0,99
16.05.14	5,65	1,17	27.06.14	5,50	0,99
17.05.14	5,75	1,17	28.06.14	5,60	0,99
18.05.14	5,85	1,17	29.06.14	5,70	0,99
19.05.14	5,61	1,18	30.06.14	5,81	1,20

Datum	pH	EC
01.07.14	5,81	1,20
02.07.14	5,82	1,20
03.07.14	5,83	1,24
04.07.14	5,80	1,24
05.07.14	5,78	1,24
06.07.14	5,75	1,23

Versuch 4

06.07.14	5,49	1,00
07.07.14	5,52	1,02
08.07.14	5,56	1,02
09.07.14	5,60	1,02
10.07.14	5,65	1,02
11.07.14	5,72	1,19
12.07.14	5,74	1,19
13.07.14	5,76	1,19
14.07.14	5,78	1,19
15.07.14	5,79	1,39
16.07.14	5,79	1,39
17.07.14	5,79	1,39
18.07.14	5,79	1,39
19.07.14	5,79	1,39
20.07.14	5,79	1,39
21.07.14	5,78	1,41
22.07.14	5,80	1,41
23.07.14	5,80	1,61
24.07.14	5,90	1,61
25.07.14	5,83	1,80
26.07.14	5,90	1,80
27.07.14	5,80	1,88
28.07.14	5,82	1,90

7.2. Anhang Versuchsanordnung

Tray 1

10		11
	8	
7		9
	5	
4		6
	2	
1		3

Tray 2

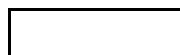
21		22
	19	
18		20
	16	
15		17
	13	
12		14

Tray 3

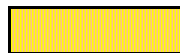
32		33
	30	
29		31
	27	
26		28
	24	
23		25

Tray 4

43		44
	41	
40		42
	38	
37		39
	35	
34		36



Kontrolle



Dreieck



Kegel



Halbkugel, Pyramide, Quadrat

7.3. Anhang Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

Versuch 2 – SPSS Auszug K-S-Test

	N	Parameter der Normalverteilung ^{a,b}		Extremste Differenzen			Kolmogorov-Smirnov-Z	Totale Signifikanz (2-seitig)
		Mittelwert	Standardabweichung	Absolut	Positiv	Negativ		
GesamtTM	44	1,63	,429	,092	,092	-,084	,613	,847
Blattanzahl	44	34,48	4,663	,116	,099	-,116	,768	,597
Blattfläche	44	778,85	120,154	,199	,199	-,102	1,317	,062
Wurzelvolumen	44	272,86	132,798	,124	,124	-,091	,822	,509
Wurzellänge	44	1990,83	713,321	,092	,092	-,084	,609	,852
Wurzelverzweigung	44	683,1818	240,22047	,071	,071	-,048	,473	,979
FMBlatt	44	29,83	8,130	,096	,075	-,096	,637	,811
FMWurzel	44	4,52	1,337	,095	,095	-,083	,633	,818
TMBblatt	44	1,41	,375	,096	,096	-,085	,639	,809
TMWurzel	44	,22	,062	,129	,119	-,129	,853	,461

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Versuch 4 – SPSS Auszug K-S-Test

	N	Parameter der Normalverteilung ^a ^b		Extremste Differenzen			Kolmogorov-Smirnov-Z	asymptotische Signifikanz (2-seitig)
		Mittelwert	Standardabweichung	Absolut	Positiv	Negativ		
GesamtTM	44	,59	,143	,090	,090	-,048	,594	,872
Blattanzahl	44	14,93	2,117	,137	,137	-,090	,911	,377
Blattfläche	44	296,92	66,442	,081	,081	-,047	,537	,935
Wurzelvolumen	44	97,47	62,680	,102	,102	-,089	,679	,746
Wurzellänge	44	980,00	399,564	,135	,135	-,091	,895	,400
Wurzelverzweigung	44	333,6136	98,10631	,098	,098	-,053	,650	,792
FMBlatt	44	7,94	1,966	,074	,074	-,062	,493	,968
FMWurzel	44	1,79	,664	,094	,094	-,066	,625	,829
TMBlatt	44	,49	,113	,062	,062	-,049	,414	,995
TMWurzel	44	,10	,032	,124	,124	-,056	,824	,506

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

7.4. Anhang Einfaktorielle ANOVA

Zwischen den Gruppen = ZdG

Innerhalb der Gruppen = IdG

Versuch 2

Einfaktorielle ANOVA

		Quadrat- summe	df	Mittel der Quadrate	F	Signifi- kantz
Blattanzahl	Zwischen den Gruppen	5	3	1,659	,071	,975
	Innerhalb der Gruppen	930	40	23,250		
	Gesamt	935	43			
Blattfläche	ZdG	17314	3	5771,301	,383	,766
	IdG	603474	40	15086,862		
	Gesamt	620788	43			
Wurzelvolumen	ZdG	287045	3	95681,745	8,121	,000
	IdG	471278	40	11781,952		
	Gesamt	758323	43			
Wurzellänge	ZdG	76978	3	25659,293	,047	,986
	IdG	21802551	40	545063,773		
	Gesamt	21879529	43			
Wurzelverzweigung	ZdG	18705	3	6234,970	,101	,959
	IdG	2462648	40	61566,191		
	Gesamt	2481353	43			
FMBlatt	ZdG	69,515	3	23,172	,334	,801
	IdG	2772,667	40	69,317		
	Gesamt	2842,182	43			
FMWurzel	ZdG	1,911	3	,637	,340	,797
	IdG	74,976	40	1,874		
	Gesamt	76,888	43			
TMBlatt	ZdG	0,181	3	,060	,412	,745
	IdG	5,861	40	,147		
	Gesamt	6,042	43			
TMWurzel	ZdG	0,004	3	,001	,290	,832
	IdG	0,163	40	,004		
	Gesamt	0,167	43			
GesamtTM	ZdG	0,221	3	,074	,384	,765
	IdG	7,687	40	,192		
	Gesamt	7,909	43			

Versuch 4

Einfaktorielle ANOVA

		Quadrat- summe	df	Mittel der Quadrate	F	Signifi- kanz
Blattanzahl	Zwischen den Gruppen	2	3	,689	,145	,933
	Innerhalb der Gruppen	191	40	4,768		
	Gesamt	193	43			
Blattfläche	ZdG	2315	3	772	,165	,920
	IdG	187512	40	4688		
	Gesamt	189826	43			
Wurzelvolumen	ZdG	14287	3	4762	1,232	,311
	IdG	154653	40	3866		
	Gesamt	168939	43			
Wurzellänge	ZdG	32434	3	10811	,063	,979
	IdG	6832575	40	170814		
	Gesamt	6865009	43			
Wurzelverzweigung	ZdG	20921	3	6974	,710	,552
	IdG	392947	40	9824		
	Gesamt	413868	43			
FMBlatt	ZdG	0,401	3	,134	,032	,992
	IdG	165,802	40	4,145		
	Gesamt	166,203	43			
FMWurzel	ZdG	0,030	3	,010	,021	,996
	IdG	18,906	40	,473		
	Gesamt	18,937	43			
TMBlatt	ZdG	0,004	3	,001	,090	,965
	IdG	0,549	40	,014		
	Gesamt	0,553	43			
TMWurzel	ZdG	0,000	3	,000	,099	,960
	IdG	0,043	40	,001		
	Gesamt	0,043	43			
GesamtTM	ZdG	0,006	3	,002	,095	,963
	IdG	0,879	40	,022		
	Gesamt	0,885	43			

7.5. Anhang Regression Volumen/Masse

Versuch 4 Variante a

Koeffizienten ^a		Korrelation nach PEARSON
Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten	R
	Regressionskoeffizient B	
1 (Konstante)	,442	,697 ^a
Volumen	,002	

a. Abhängige Variable: Masse

Versuch 4 Varianten B, C, G

Koeffizienten ^a		Korrelation nach PEARSON
Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten	R
	Regressionskoeffizient B	
2 (Konstante)	,467	,537 ^a
Volumen	,001	

a. Abhängige Variable: Masse

8 Inhalt Anhangs-CD

Die der Arbeit anhängende CD enthält folgende Daten:

- Bilder
- Klimadaten
- Urdaten
- Arbeit in digitaler Form (.pdf)